



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ELINA TIRKKONEN
VESITIIVIS KAIVANTO PORAPAAALUSEINÄRAKENTEELLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden- ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 9. maalisi-
kuuta 2016

TIIVISTELMÄ

Elina Tirkkonen: Vesitiivis kaivanto porapaaluseinärakenteella

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 105 sivua, 0 liitesivua

Huhtikuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: porapaaluseinä, vesitiivis, kaivanto, tukiseinä, RD-paalu, suihkuinjektointi, patoseinä

RD-paaluseinän käyttö patoseinänä on yleistynyt. Tämän diplomityön tavoitteena on ollut kartoittaa RD-paaluseinän vesitiiveyteen liittyviä ongelmia. Samalla tarkoituksena on ollut selvittää porapaaluseinän käytön järkevyyttä tukiseinänä. Tämä tehtiin vertaamalla rakennetta muihin vesitiiviisiin tukiseiniin sekä selvittämällä sen kustannuksia.

Tutkimus koostuu kirjallisuusselvityksestä, haastattelututkimuksesta sekä tapaustutkimuksesta. Kirjallisuusselvityksessä selvitettiin yleisiä periaatteita vesitiiviin kaivannon rakentamisesta, kartoitettiin mahdolliset vaihtoehtoiset tavat rakentaa vesitiivis kaivanto sekä tuotiin esiin porapaaluseinän valmistajan ohjeistus vesitiiveyteen. Haastattelututkimuksessa kartoitettiin RD-paaluseinän vesitiiveyttä koskevia näkemyksiä urakoitsijoilta, tilaajilta sekä suunnittelijoilta, jotka ovat olleet osallisina vesitiiviin RD-paaluseinän rakentamisessa. Kyseessä ovat haastateltavien subjektiiviset mielipiteet. Tapaustutkimuksessa koostettiin Kalasataman REDI-hankkeessa kertyneitä kokemuksia ja tietoa RD-paaluseinärakenteesta patoseinänä.

Rakenteen vesitiiveydessä ilmeni haasteita paalun kalliokontaktissa, lukoissa ja ankkureiden läpiviennissä. Käytetyt keinot vesitiiveyden parantamiseen kalliokontaktissa ovat kallioinjektointi, RM\RF -lukon kautta tapahtuvat injektointi sekä suihkupaalutus. Myös paalun betonointia suurella paineella IT-massalla pidettiin pätevänä injektointikeinona kalliokontaktiin. Lukon vesitiiveyden parantamiseksi käytetään bitumointia sekä latta-raudoitusta ja injektointia. Ankkureiden läpivientien työnaikaiseksi vesitiiveyden turvaamiseksi käytetään ankkurilinjojen taustan suihkuinjektointia. Näistä kaikista vesitiiveyttä parantavista keinoista lukon kautta tapahtuvaa injektointia pidettiin yleisesti toimimattomimpana. Myös lukkojen bitumointi kyseenalaistettiin. Suihkupaalutus oli muodostunut ensisijaiseksi kalliokontaktin vesitiiveyttä parantavaksi toimenpiteeksi korvaamaan lukon kautta tapahtuvan injektoinnin toimimattomuutta.

Porapaaluseinä on erinomainen tuote suomalaisen maaperään. Lohkareiseenkin maaperään se on nopea asentaa, upotus kallioon vähentää seinän tuentatarvetta ja samaan asennustarkkuuteen ei päästä muilla tukiseinillä. Kuitenkin kokonaisratkaisuksi patoseinänä RD-paaluseinässä on vielä kehitettävää. Mitoitusikävaatimukset ovat kasvaneet. Lisäksi rakennetta käytetään kohteissa, jotka ovat ennen olleet rakentamiselle kelpaamattomia ja varsin usein sisältävät voimakkaasti pilaantuneita maita. Tämän kaiken vaikutus rakenteen vaadittuun pitkäaikaiskestävyyteen, ja etenkin lukkorakenteeseen, ovat aiheita, joita olisi syytä tutkia perusteellisemmin.

ABSTRACT

Elina Tirkkonen: Watertight excavation with the drilled pile wall

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 105 pages, 0 Appendix pages

April 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: RD pile wall, watertight, excavation, Retaining wall, RD pile, Jet grouting, cutoff wall

Using an RD pile wall as a cutoff wall has become more common. This study examined issues on watertightness of the RD pile. Moreover, the study explored benefits of using the drilled pile wall as a retaining wall. Benefits are determined by a structural comparison between watertight retaining walls, as well as, an economical evaluation of the costs is considered.

The study is comprised of a literature review, an interview study and a case study. The literature review presented common principles concerning the construction of the watertight excavation. Moreover, alternative solutions to the construction of watertight excavations were explored. Furthermore, the instructions on watertight construction process, given by the manufacturer of the drilled pile wall, were reviewed. The interview study presented opinions of the participants, such as contractors, buyers and designers, who were involved in the construction process of the water tight RD pile wall. The opinions of the participants are subjective. The case study precised experiences and data, from the REDI project collected by Kalasatama, on using the RD pile wall as a cutoff wall.

Watertightness of the structure was proved to be challenging in terms of contact with the rock, locks and anchor lead-through of the piles. Techniques to improve watertightness in contact with the rock are rock injection grouting, injection grouting via an RM/RF lock and jet grouting. In addition, concreting the pile with high pressure IT mass was considered as a valid injection method in order to improve contact with the rock. Bituminization, flat bar reinforcement and grouting were used to improve the watertightness of the lock. Jet grouting of the anchor line's background was used for the anchor lead-through during the work process. Amongst these techniques, the injection grouting via the lock was considered as a non-functional solution. Likewise, the functionality of the bituminization was questioned. By contrast, jet grouting was established its position as an overriding technique to improve watertightness and to fix lock injection grouting's failure to operate.

The drilled pile wall is an outstanding product which suits for the Finnish soil. The installation is fast regardless of the rocky soil and the immersion in the rock reduces demands for bearing. Furthermore, similar installation tolerances cannot be achieved with other retaining walls. Nevertheless, using the RD pile as a cutoff is a comprehensive solution which needs further development. For instance, previously the request for lifetime has increased. Moreover, the solution is applied to the construction objects which heretofore have been perceived as unsuitable for construction, and the lands are considered containing strongly contaminated soil. Altogether, the effects on required long-term resistance and especially on the lock structure are topics where further research is required.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Destia Oy:ssä, joka on työn myös rahoittanut. Mukana työssä on ollut SSAB luovuttamalla aineistoa.

Aiheen ideoivat Destian Kalasataman työmaainsinööri Heidi Kekäläinen ja teknisen toimiston johtaja Sami Kaarto. Kiitos heille tästä mahdollisuudesta. Työtä ohjasi Destialta Hannu Peltoniemi ja SSAB:n yhdyshenkilönä toimi Antti Perälä; suuri kiitos yhteistyöstä. TTY:lta ohjaajanani toimi Pauli Kolisoja. Valtava kiitos kannustavasta ja rakentavasta ohjauksesta. Parasta työssäni oli haastatella alan huippuosajia. Lämmin kiitos jokaiselle haastatteluun suostuneelle.

Suurin kiitos kuitenkin kuuluu perheelleni. Ilman Viiviaa ja Anttia elämäni olisi vain merkityksetöntä puurtamista ja ilman Irinaa ja hänen lastenhoitoapuaan olisivat opintoni jääneet kesken.

Paimiossa, 17.4.2016

Elina Tirkkonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoite	1
1.3	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen rakenne.....	2
2.	KAIVANNON KUIVANAPITO.....	3
2.1	Pohjavedenpinnan alapuolelle rakentamisen vaikutus kaivantotyön vaativuuteen	3
2.2	Kaivannon kuivanapito kaivannosta pumppaamalla ja pohjavettä alentamalla.....	8
2.3	Kaivannon kuivanapito katkaisemalla veden virtausyhteys.....	14
2.3.1	Menetelmän peruseräite	14
2.3.2	Teräsponttiseinä	16
2.3.3	Kaivinpaaluseinä.....	18
2.3.4	CFA-paaluseinä.....	19
2.3.5	Kaivantoseinä.....	20
2.3.6	Suihkuinjektoitu seinä.....	21
2.3.7	Porapaaluseinä	24
2.4	Esimerkkejä vesitiiviiden kaivantojen toteuttamisesta vaihtoehtoisilla tavoilla	24
2.4.1	Pasilan Tripla – vibraamalla ja poraamalla asennettava porapaaluseinä.....	25
2.4.2	Bentoniittilieteseinät, membraaniseinät ja TRD	28
2.4.3	Baltian tapa rakentaa kaivantoja – staattisesti painamalla asennettavat teräspontit	31
3.	PORAPAALUSEINÄN AVULLA TOTEUTETTAVA	
	VESITIIVIS RAKENNE	33
3.1	Porapaaluseinän rakentaminen.....	33
3.2	Porapaaluseinän vesitiiveys.....	39
3.2.1	Lukkoprofiilin vesitiiveys	40
3.2.2	Paalun alapään vesitiiveys kalliossa	47
3.2.3	Ankkurien läpiviennit	48
4.	PORAPAALUSEINIEN VESITIIVEYTTÄ	
	KOSKEVA HAASTATTELUTUTKIMUS	50
4.1	Haastattelun toteutus	50
4.2	Urakoitsijoiden ja tilaajien haastattelut	51
4.2.1	Miksi porapaaluseinärakenne valittiin kohteeseen?.....	51
4.2.2	Vesitiiveyden ongelmat.....	52
4.3	Suunnittelijoiden haastattelut	56
4.3.1	Porapaaluseinärakenteelle soveltuvat kohteet.....	56
4.3.2	Vesitiiveyden ongelmat.....	57

4.3.3	Kilpailevat rakenteet	59
4.4	Yhteenveto	59
5.	CASE KALASATAMAN KESKUS	61
5.1	Maaperätiedot.....	62
5.2	Ensimmäisen vaiheen patoseinät.....	64
5.2.1	Ensimmäisen vaiheen patoseinien suunnitelmat.....	65
5.2.2	Ensimmäisten vaiheen patoseiniin liittyneet ongelmat.....	66
5.3	Toisen vaiheen patoseinät	69
5.3.1	Toisen vaiheen patoseinien suunnitelmat	69
5.3.2	Toisen vaiheen patoseinien rakentaminen vesitiiviiksi.....	72
6.	PORAPAAALUSEINIIN SISÄLTYVÄT KUSTANNUSRISKIT JA	
	NIIDEN HALLINTA.....	87
6.1	Riski ja riskinhallinta	87
6.2	Riskit ja riskienhallinta sovellettuna porapaaluseinään	91
6.3	Porapaaluseinän kustannukset Kalasatamassa	95
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	99
	LÄHTEET.....	101

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Kaupunkirakenteen tiivistymisen myötä Suomessa tullaan yhä enenevissä määrin rakentamaan maaperältään haastavammille alueille ja rakennukset yltävät syvemmälle ja korkeammalle kuin ennen. Geotekniikan kannalta tämä merkitsee yhä vaativampia kaivantoja. Maan vahvistusrakenteille, kaivannoille ja vesitiiveydelle asetetaan tiukempia ja monimutkaisempia vaatimuksia.

Vaativimpien kaivantojen mahdollistumiseksi Ruukki Construction Oy kehitti RD -paaluseinän. Tämä noteerattiin myös Suomen Geoteknillisessä Yhdistyksessä, joka antoi keksinnöstä GeoTeko -tunnustuspalkinnon vuonna 2012 (RIL 2012). Palkitsemisen yhtenä perusteena oli rakenteen hyvä vaste kentältä tulevaan tarpeeseen.

Ruukin RD -paaluseinää markkinoidaan vesitiiviinä patoseinänä, joka soveltuu kivikkoiseen ja lohkaraiseenkin maaperään sekä profiililtaan kaltevaan kallioperään. Toisin sanoen menetelmä mahdollistaa yhä vaativampien kaivantojen rakentamisen sekä rakentamisen ennen rakennuskelvottomaksi arvioituille alueille.

Uudelle rakenteelle tyypillisesti suunnitteluratkaisut ovat olleet hyvin vaihtelevia riippuen suunnittelijasta. Kyseessä on hyvin vaativa rakenne, jonka suunnittelun ja toteutuksen ohjeistus on vielä kehittymässä käyttökokemusten kasvaessa. Nyt suunnitteluratkaisuissa usein maksimoidaan kaikin mahdollisin tavoin varmuutta, mikä puolestaan merkitsee myös kustannusten kasvamista. Kentältä kantautuvan kritiikin mukaan suunniteluissa ratkaisuihin käy tilaajien mielestä ilmi, että RD -paaluseinän vesitiiveyteen ei luoteta, vaan sen varmistamiseen käytetään kaikki keksityt keinot, vaikka ne eivät olisi koh-teessa edes kovin perusteltuja.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tässä diplomityössä tutkitaan RD-paaluseinärakenteen avulla toteutettavia vesitiiviitä kaivantoja. Tutkimuksen tavoitteena on koostaa SSAB:lle kokemuksia tausta-aineistoksi tulevaan vesitiiveyttä käsittelevään tutkimukseen. Destialle on tavoitteena koostaa Kalasataman projektista saatava tietotaito RD-paaluseinäprojektista. Kalasatamassa ensimmäisen vaiheen patoseinien vesitiiveys osoittautui haastavaksi ja kokemuksesta halutaan oppia.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen rakenne

Työssä kartoitetaan ensin kirjallisuusselvityksellä vesitiiviin kaivannon toteuttamiskeinot ja kuvataan, miksi niin järeä ratkaisu, kuin RD-paaluseinä, on tarpeellinen. Seuraavassa osiossa kartoitetaan haastattelututkimuksen keinoin RD-paaluseinän vesitiiveyden ongelmia ja ratkaisuja. Kolmannessa osiossa esitellään tapaustutkimus Kalasataman REDI -työmaalta. Neljännessä osiossa on rakenteen riskitarkastelu, jossa on lisäksi hahmoteltu yleisesti kalliina pidetyn patoseinän kustannuksia.

2. KAIVANNON KUIVANAPITO

Kaivantoon maapohjan kautta tulevaa vuotovesimäärää joudutaan rajoittamaan ympäristön pohjavesitason säilyttämiseksi ja/tai kaivannon kuivanapidon mahdollistamiseksi. Useasti myös kaivantorakenteet toimivat osana pysyvää patorakennetta. Yleensä kaivannolta ei vaadita täydellistä vesitiiveyttä, vaan termillä vesitiivis kaivanto viitataan kaivantoon, jossa sallittu vesivuotomäärä on rajoitettu vähäiseksi.

2.1 Pohjavedenpinnan alapuolelle rakentamisen vaikutus kaivantotyön vaativuuteen

Kaivannon vesitiiveysvaatimus merkitsee kaivannon vaativuusluokituksessa kaivannon kuulumista vaativiin tai erittäin vaativiin kaivantoihin taulukon 3 mukaisesti. Vaativuusluokitus vaikuttaa kaivannon toteutukseen kokonaisuudessaan ohjaten pohjatutkimuksia, suunnittelua, rakentamista ja valvontaa. Vaativuusluokitus tukeutuu osin eurokoodijärjestelmään ollen kuitenkin siitä erillinen, tarkentava luokitus. Luokituksessa täsmennetään taulukossa 2 esitettyjen eurokoodin geoteknisten luokkien (GL1 – GL3) ja taulukossa 1 esitettyjen seuraamusluokkien (CC1 – CC3) määritelmiä kaivantojen osalta. (RIL 263-2014)

Taulukko 1. Seuraamusluokkien määrittely (RIL 207-2009)

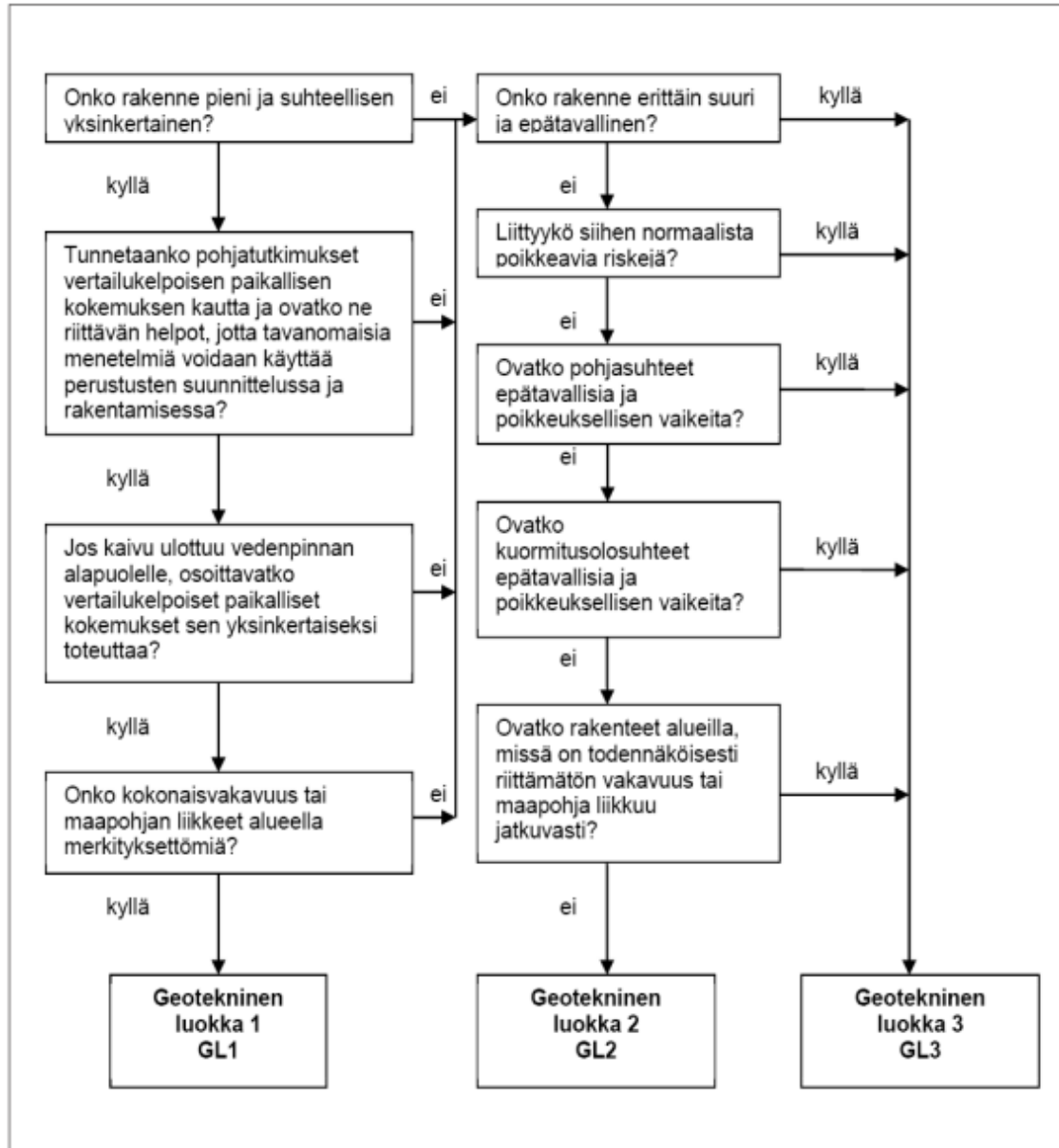
Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenki- en menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosi- neen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten <ul style="list-style-type: none"> • yli 8-kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori- ja liikeraken- nukset • konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot • raskaasti kuormitettut tai suuria jännevälejä sisäl- tävät rakennukset Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisten maalajien alueilla siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmis- henkien menetysten tai merkittä- vien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmis- henkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinko- jen takia	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten esim. varastot Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten <ul style="list-style-type: none"> - matalalla olevat alapohjat ilman kellaritiloja - ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykis- tävän rungon osana <ul style="list-style-type: none"> - standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokkien (structu- ral class) II ja III muotolevyrakenteet. - standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokan (structural class) I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille ³⁾.

¹⁾ ylä- ja välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena. Rakennuksen koostuessa erilaisista toisistaan riippumattomista rakennusosista määritetään kunkin osan seuraamusluokka erikseen.

²⁾ kellarikerrokset mukaan luettuina.

³⁾ ei koske kuormituksia, jotka syntyvät, kun muotolevyrakenteita käytetään siirtämään levytason suuntaisia leikkausvoimia (levyvaikutuksen hyväksikäyttö) tai normaalivoimia.

Taulukko 2. Geoteknisen luokituksen lohkokaavio. (RIL 207-2009)



Vaativuusluokan määrittäminen perustuu vastaavan pohjarakennesuunnittelijan kokonaisvaltaiseen arvioon. Jos kaivannossa toteutuu vain yksi ”erittäin vaativa/GL3/CC3” -luokan kriteeri, se ei vielä välttämättä luokittele kaivantoa tähän vaativuusluokkaan. Yleisohjeena Kaivanto-ohje opastaa, että kun kaivannossa toteutuu yksi ”erittäin vaativa/GL3/CC3” -luokan kriteeri, vaativuusluokka on vähintään vaativa ja kun kriteereitä toteutuu vähintään kaksi, vaativuusluokka on automaattisesti erittäin vaativa. (RIL 207-2009)

Taulukko 3. Kaivannon vaativuusluokitus. (RIL 263-2014)

Luokituskriteerit	Tavnomainen	GL1	Vaativa	GL2	Erittäin vaativa	GL3
1 Pohjoolosuhteiden vaihtelu						
1.1 Maapohjan kerrosrakenteen vaihtelu	pieniä		keskimääräistä		suurta	
1.2 Geoteknisten mitoitusarvojen vaihtelu	pieniä		keskimääräistä		suurta	
1.3 Maapohjan kivisyys, lohkeaisuus ja tiiviys	ei häiritse teräsponttien maahansaattamista		häiritse jossain määrin teräsponttien maahansaattamista		estää teräsponttien maahansaattamisen normaalimenetelmin	
2 Kaivannon syvyys						
2.1 Rakennuskaivannon syvyys	$C_u > 25 \text{ kN/m}^2$ $\varphi > 32^\circ$ $C_u = 25 \dots 10 \text{ kN/m}^2$ $\varphi = 32 \dots 25^\circ$ $C_u < 10 \text{ kN/m}^2$	< 5m < 4m < 3m	5...10 m 4...8 m 3...6 m	> 10 m > 8 m > 6 m		
2.2 Putkikaivannon syvyys	$C_u > 25 \text{ kN/m}^2$ $\varphi > 32^\circ$ $C_u = 25 \dots 10 \text{ kN/m}^2$ $\varphi = 32 \dots 25^\circ$ $C_u < 10 \text{ kN/m}^2$	< 3m < 2m < 1,5m	3...6 m 2...4 m 1,5...3 m	> 6 m > 4 m > 3 m		
2.3 Tukiseinän korkeus, rakennuskaivanto	< 10m		10...15 m	> 15 m		
2.4 Tukiseinän korkeus, putkikaivanto	tukematon/tuenta-elementit		< 12 m	> 12 m		
2.5 Maapohjan lujuus tukiseinän alapäässä				$C_u < 10 \text{ kN/m}^2$		
3 Pohjavesiolosuhteet ja pohjaveden hallinta						
3.1 Pohjaveden virtausyhteys kaivantoon maapohjan kautta	on		on		on	
3.2 Pohjaveden virtausyhteys kaivantoon kalliopohjan kautta	ei		ei		on	
3.3 Kaivannon pohjan hydraulisen murtuman riski	ei sallitaan		ei sallita		ei sallita	
3.4 Ympäristön pohjavesitasen aleneminen	< 0,5 m kaivun jälkeen		0,5...3m ennen kaivua		> 3m ennen kaivua	
3.5 Pohjaveden alennustarve kaivannossa			osittainen vesitiiviys		hyvä vesitiiviys	
3.6 Kaivannon vesitiivisyysvaatimus	ei vesitiivisyysvaatimusta		kaivun jälkeen kalliopinnalta		ennen kaivua maanpinnalta	
3.7 Tukiseinän alapään kallioliittoksen tiivistys	ei tarvetta		kaivun jälkeen kalliopinnalta		ennen kaivua maanpinnalta	
3.8 Kalliopohjan verhoinjektointi	ei tarvetta		kaivun jälkeen kalliopinnalta		ennen kaivua maanpinnalta	
4 Ympäristöolosuhteet ja ympäristövaikutusten hallinta						
4.1 Kaivannon vaikutusalueella olevat rakenteet	ei		on		on	
Perustuksia maapohjan muodonmuutoksen riskialueella			paalutus tai kalliionvarainen		maanvarainen	
Perustamistapa			vaatii lujitusta-ja/tai tiivistystä		vaatii tuentaa (pystykuormien siirtoa) tai jäykkää ja siirtymätöntä tukiseinää	
4.2 Rakenteiden lujitus-, tiivistys- ja tuentatarve	ei tarvetta					
4.3 Louhinnan vaikutus ympäristöön						
Louhinnan etäisyys säilytettävästä rakenteesta	> 25 m		25...5 m		< 5 m	
Louhinnan etäisyys tärinäherkistä laitteesta	> 50 m		50...15 m		< 15 m	
4.5 Tärinän vaikutuksesta tiivistyvät löyhät kitkamaakerrokset	ei		ei		on	
4.6 Rakennuspaikan ahtaus	väljä		ahtas		hyvin ahtas (rakennuksen sisällä, sisäpiha tai vastaava)	
5 Kaivantorakenteisiin kohdistuvia kuormia						
5.1 Maanpaine	maanpaine		maanpaine		maanpaine siirtymätöntä rakennetta vastaan	
5.2 Vedenpaine	ei		vedenpaine		vedenpaine	
5.3 Liikennekuormat	ei		tieliikennekuorma tai vastaava		junakuorma tai vastaava	
5.4 Tärinä	tiivistytärinä		paalutus- ja louhintatärinä		paalutus- ja louhintatärinä	
6 Muut kriteerit						
7 Kaivannon vaativuusluokka kokonsuutensa						

Kaivannon vaativuusluokka määrittää geoteknisen suunnittelun vaativuusluokan. Tämä asettaa suunnittelijalle kelpoisuusvaatimuksia. Kun kaivannon vaativuusluokka on erittäin vaativa, suunnittelijalta edellytetään poikkeuksellisen vaativan suunnittelutehtävän tai vaativan suunnittelutehtävän mukaista kelpoisuutta. Myös vastaavalta työjohtajalta

edellytetään vastaavasti poikkeuksellisen vaativan kohteen työnjohtajan tai vaativan kohteen työnjohtotehtävän kelpoisuutta. Tämä on koottuna taulukossa 4. Koska kyseessä on luvanvarainen rakentaminen, suunnittelijan sekä vastaavan työnjohtajan kelpoisuuden arvioi rakennusvalvontaviranomainen. (RIL 263-2014)

Taulukko 4. Suunnittelutehtävän ja työnjohtotehtävän vaativuusluokat. (RIL 263-2014)

Kaivannon vaativuusluokka	Suunnittelutehtävän vaativuusluokka MRL 120 d §	Työnjohtotehtävän vaativuusluokka MRL 122 b §
Erittäin vaativa	Erittäin vaativa	Erittäin vaativa
	Vaativa	Vaativa
Vaativa		
Tavanomainen	Tavanomainen	Tavanomainen
	Vähäinen	Vähäinen

Vaativuusluokitus vaikuttaa myös pohjatutkimuksiin. Taulukossa 5 on suuntaa-antavasti määritetty rakennuskaivannon pohjatutkimusohjelma vaativuusluokan mukaan. (RIL 207-2009)

Taulukko 5. Rakennuskaivannon pohjatutkimusohjelma. (RIL 263-2014)

TAULUKKO 3.1 RAKENNUSKAIVANNON POHJATUTKIMUSOHJELMA (SUOSITUS)

TUTKIMUSKOHDTE	TUTKIMUSMENETELMÄ	TUTKIMUSPISTEMÄÄRÄ KAIVANNON VAATIVUUSLUOKITTAIN		
		TAVANOMAINEN	VAATIVA	ERITTÄIN VAATIVA
Rakennuspaikan kartoitus 1)				
Kunnallitekniikka, maakaapelit, ilmajohdot (kartoitus)	Johtokartat, koekuopat ja tarkemmittaus	x	x	x
Kaivantoon rajoittuvien rakententeet (sijainti)	Koekuopat, tarkemmittaus		x	x
Maanpinta 1)	Kartoitus ja pintavaaitus	x	x	x
Maapohjan kerrosrakenne ja maalajit 1)				
Kerrosrakenne, kerrospaksuudet	Painokairaus tai puristinheijarikairaus			
Maalajit, tiiviydet	tutkimusalueella	1/400 m ²	1/400 m ²	1/200..400 m ²
Kivisyys, lohkeaisuus	tukiseinälinjalla/luiskalinjalla	1/20 m	1/10 m	1/10 m
	Maanäytesytsarja, rakeisuusmäärittys	1/1600 m ² , väh. 2	1/1200 m ² , väh. 3	1/800 m ² , väh. 3
Geotekniset mitoitusarvot 1)				
Hienorakeiset maakerrokset, lyhytaikainen mitoituslilanne	Siipikairaus tutkimusalueella	1/2400 m ² , väh. 3	1/2400 m ² , väh. 3	1/1600 m ² , väh. 3
Hienorakeiset maakerrokset, pitkäaikainen mitoituslilanne	Häiriintymätön maanäytesytsarja tutkimusalueella		1/2400 m ² , väh. 2	1/1600 m ² , väh. 2
	Maanäytesytsistä kolmiaksaialikoesarja (väh. 3 leikkausta)		1/maakerros	1/maakerros
Kalliopohja				
Kalliopinnan sijainti	Porakonekairaus kallioon 3 m, kun kaivanto ulottuu kallioon			
	kaivantoalueella	2)	1/800 m ²	1/400 m ²
	tukiseinälinjalla/luiskalinjalla 3)	1/20 m	1/10 m	1/10 m
	tukiseinälinjan takana 4)		1/20 m	1/20 m
Kalliopohjan rikkonaisuus	Vesipainekoe porakonekairausrei'istä kaivantoalueella 5)			vähintään 2
	Vesipainekoe porakonekairausrei'istä tukiseinälinjalla 5)			vähintään 2
	Kallioreiän videokuvauus			2)
Pohjavesi				
Pohjaveden taso kaivantoalueella	Koekuoppa tai havaintoputki	1..2		
	Havaintoputki kaivantoalueella		vähintään 2	vähintään 2
Pohjaveden taso kaivannon ympäristössä	Havaintoputki kaivannon ympäristössä		vähintään 2	vähintään 2
Pohjaveden virtausolosuhteet maapohjassa	Koepumppaus ja seuranta havaintoputkista 6)		vähintään 2	vähintään 2
Pohjaveden virtausolosuhteet kalliossa	Koepumppaus kalliossa kaivantoalueella			7)
	Koepumppaus kalliossa tukiseinälinjalla			7)
Kaivantotyön toteutusedellytykset				
Teräsponttien tunkeutuminen tavoitetasoon	Tunkeutuminen varmistaminen koepontituksella		8)	8)

Tutkimuspisteiden sijainnin tulee palvella tukiseinän tavoitetason määrittelyä ja tutkimuspisteet sijoitetaan luonnollisesti tukiseinälinjalle. Porakonekairaukset ovat välttämättömiä, kun käytetään kallioon tukeutuvia paaluja. Taulukossa 6 on selvennetty vielä geoteknisen luokan mukaisesti tarvittavat kairaukset. (RIL 207-2009)

Taulukko 6. Geoteknisten luokkien mukaan vaaditut kairaukset. (RIL 254-2011)

	GL1	GL2	GL 3
Lyöntipaalut	DP, WST	DP, WST, B	DP, WST, B
Puristuspaalut	DP, WST	DP, WST, CPT/CPTU	DP, WST, B, CPT/CPTU
Porapaalut	B	DP, WST, B	DP, WST, B
Kaivinpaalut	WST, B	DP, WST, B	DP, WST, B

Taulukossa käytetyt lyhenteet SFS-EN 1997-2 mukaisesti, porakonekairausta ei esitetty SFS-EN1997-2.

Painokairaus WST

Heijarikairaus DP

Porakonekairaus B

Puristinkairaus CPT/CPTU (CPTU on puristinkairaus huokosvedenpaineen mittauksella)

Geotekninen luokitus ja seuraamusluokka määräävät myös kohteen paalutusluokan. Porapaalutuksessa tällä ei sinällään ole merkitystä, sillä paalutustyöluokka ei vaikuta porapaalun geotekniseen tai rakenteelliseen mitoittamiseen ellei suunnittelija perustellusta syystä toisin esitä. Paalutustyöluokka vaikuttaa porapaalutuksen osilta hitsattujen jatkosten hitsausluokkaan. (RIL 254-2011)

2.2 Kaivannon kuivanapito kaivannosta pumppaamalla ja pohjavettä alentamalla

Pohjaveden alentamista käytetään Suomessa yleisesti kaivantojen kuivanapitokeinona. Alentamisen avulla perustustyöt helpottuvat, vältetään luiskasortumilta sekä maamassojen käsiteltävyys- ja kuljetusominaisuudet paranevat. Samalla on kuitenkin huomioitava pohjaveden alentamisen liittyvät riskitekijät. (Vallius 2005)

Lyhytaikainen pohjaveden alentaminen ei yleensä aiheuta merkittäviä ympäristöriskejä. Lähialueen kaivot saattavat toki kuivua väliaikaisesti. Jos työnaikainen alentaminen kestää kuukausia, se saattaa aiheuttaa vaurioita kasvillisuudelle sekä maanvaraisten ja joskus jopa paaluille perustettujen rakenteiden ja rakennusten painumista. Painumien riski koittaa, jos maaperä on koostumukseltaan hienorakeista tai eloperäistä. Hyvin lyhytaikainen alentaminen ei yleensä aiheuta puupaalujen lahoamista. (Vallius 2005)

Pysyvään alentamiseen joudutaan, kun pohjavedenpinnan alapuolelle rakennetaan mutta ei haluta lähteä taloudellisesti hyvin kalliisiin vesitiiviisiin kaukalarakenteisiin. Toimittaessa ilman suunnitelmaa, johtaa se pahimmillaan siihen, että paljon vettä kuluttavat puut kärsivät, kaivot kuivuvat, rakennukset ja rakenteet painuvat ja paalut lahoavat. Geotekniseen suunnitteluun kuuluvat arvion laatiminen pohjaveden alentamisen vaikutuksista sekä suunnitelma haittojen vähentämiseksi ja korvaamiseksi. Vaikutusten arvioissa voidaan päätyä ratkaisuun, että pohjaveden aleneminen kielletään tai se rajataan. (Vallius 2005)

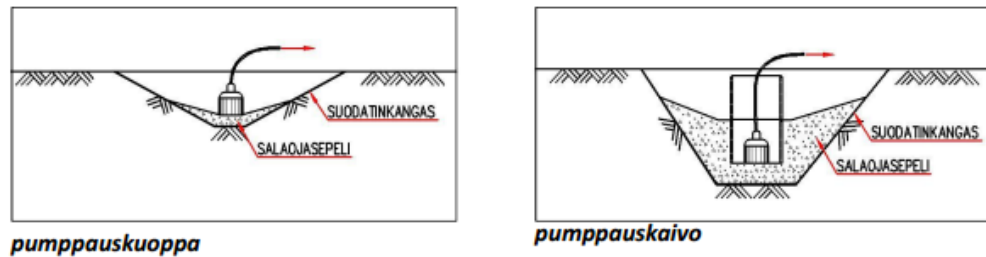
Suunnittelun tueksi asennetaan pohjavesiputkia, joiden avulla selvitetään pohjaveden pintojen tasot ja vaihtelut sekä pohjaveden virtaussuunnat. Myös vaikutusalueen laajuus

on selvitettävä varsinkin pysyvissä alentamisissa. Tämä tehdään pitkäaikaisten koepumppausten, maanäytteiden laboratoriotutkimusten, kairausten sekä geofysikaalisten tutkimusten avulla. (Molarius 2005, Vallius 2005)

Pohjaveden alentamiseen tulee lisää vaativuutta, jos vieressä tapahtuu louhintatöitä, jotka saattavat muuttaa pohjaveden virtaussuuntaa. Kalliokynnykset toimivat pohjaveden virtauksen vedenjakajina. Kun kynnykset poistetaan, muuttuvat virtaussuunnat alkuperäisestä poikkeaviksi. Työmaalla tämä saattaa näkyä siten, että pohjavesi lähtee voimakkaasti virtaamaan rakennusalueelle. Työmaan ulkopuolella havahdutaan yleensä kuivumiseen. Louhinta- ja räjäytystyöt saattavat myös avata kallioperään uusia rakoja, joita pitkin saattaa virrata heikonpilaatuista pohjavettä alueella oleviin porakaivoihin. (Molarius 2005)

Lisää vaativuutta tuo paineellinen pohjavesi. Sitä esiintyy alueilla, joilla hyvin vettä johtava pohjavesikerros sijaitsee vettä pidättävän, esimerkiksi savikerroksen alla, ja pohjaveden muodostumisalueen pohjavedenpinta on korkeammalla kuin peitteisellä alueella. Jos pohjavettä suojaava savikerros rikkoontuu, esimerkiksi porapaalutuksen yhteydessä, muodostuu ns. artesien lähde, jossa pohjaveden pinta pyrkii vapaata aluetta vastaavalle tasolle. Tällaisissa tilanteissa hydraulinen murtuma on voimakas ja tilanteen korjaaminen likipitään mahdotonta. (Molarius 2005, Vallius 2005) Hienorakeisessa maaperässä kaivettaessa pohjavedenpinnan alapuolelle maaperän pienen vedenläpäisevyyden vuoksi pohjavedenpinnan taso on vaikea havaita kaivutöiden yhteydessä. Hienorakeisen kerroksen alla olevassa, paremmin vettä johtavassa karkearakeisessa kerroksessa vallitseva vedenpaine saattaa aiheuttaa nosteen hienorakeisen maakerroksen alapintaan. Murtuminen tapahtuu, kun vedenpaine saven alapinnassa tulee suuremmaksi kuin maakerroksen oma paino. Hydraulisen murtuman vaaraa estetään alentamalla pohjavedenpintaa kaivannon alueella. Pohjaveden riittävä alentuminen havainnoidaan pohjavesiputkista ennen kaivutöiden aloittamista. Pohjaveden alennusta on jatkettava niin kauan, kun hydraulisen murtumisen riski on olemassa. (RIL 263-2014)

Kaivantoon tulee yleensä järjestää vähintään sade- ja sulamisvesien kuivatus. Vedet kerätään kaivannon pohjalta kaivupohjan kallistuksin kuvan 1 mukaisesti pumppauskuoppiin tai pumppauskaivantoihin, joiden kautta vesi pumpataan ulos kaivannosta. Veden keräytymistä näihin kuoppiin voidaan tehostaa asentamalla kaivantopohjalle työnaikaisia salaojia. (RIL 263-2014)



Kuva 1. Pumpun asennuttaminen kaivantoon vesien keräämiseksi.

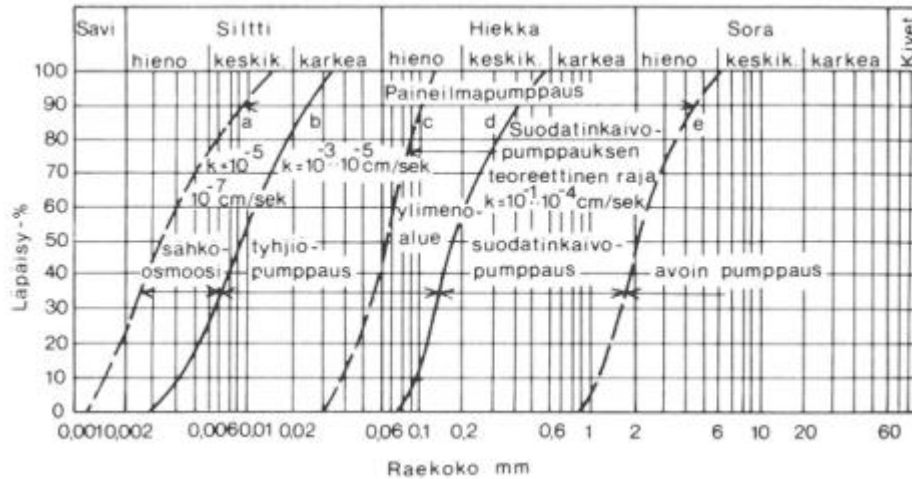
Kun kaivutaso lähestyy, maalajista riippuen, 0,5 – 1 metrin etäisyydelle pohjavedenpinnan tasosta, tulee selvittää pohjaveden alennustarve ja suunnitella sen toteutus. Jos pohjaveden alennusta tarvitaan, se voidaan tehdä ennen kaivua tai sen aikana. Jos on olemassa hydraulisen murtumisen riskiä, kyseessä on herkästi häiriintyvä maalaji, kuten siltti tai moreeni, tai kaivutyöt tehdään talvella, tulee pohjaveden alennus suorittaa etukäteen. Yleisesti itse työn suorittamisen sekä mahdollisen poiskuljetettavan materiaalin käsittävyyden vuoksi pohjaveden alennus on kannattavaa tehdä aina ennen kaivua. Kaivuutöiden alentamiseen soveltuvia maalajeja ovat hiekka, sora sekä hiekkamoreeni. Tällöinkin on otettava huomioon, että pohjaveden virtaus kaivantopohjalle pienentää pohjamaan tehokasta tilavuuspainoa, mikä puolestaan vaikuttaa tukiseinän mitoittamiseen. (RIL 263-2014) Jos pohjamaa on kauttaaltaan savea tai hyvin tiivistä moreenia, voidaan pohjavesi jättää alentamatta.

Pohjaveden alennusmenetelmä riippuu muun muassa pohjamaan vedenläpäisykertoimesta. Maan vedenläpäisevyydellä tarkoitetaan veden virtausnopeutta maa-aineksessa hydraulisen pudotuksen ollessa yksi. (Liikennevirasto 2013) Alla taulukossa 7 on kuvattu eri maalajien tyypillisiä vedenläpäisykertoimien suuruusluokkia:

Taulukko 7. Eri maalajien tyypillisiä vedenläpäisykertoimia (Liikennevirasto 2013, Leivo 2000)

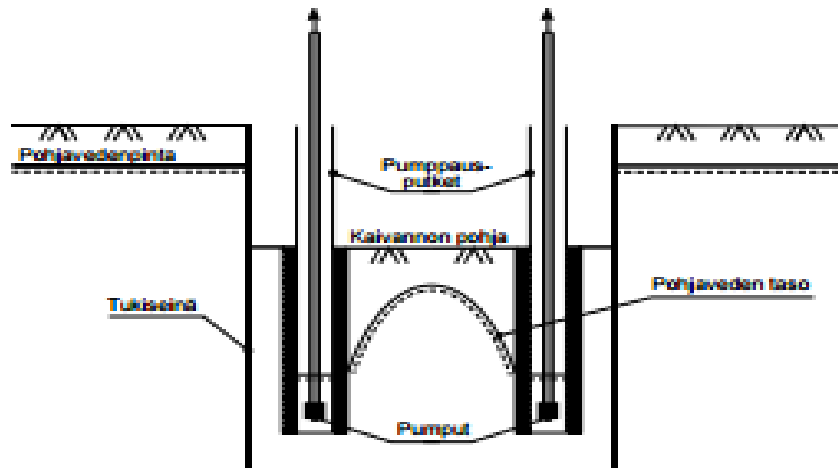
Maalaji	Vedenläpäisevyyskerroin [m/s]	Kapillaarinen nousukorkeus [m]
<u>Hyvin vettä läpäisevät</u>		
Sora	$10^{-1} \dots 10^{-4}$	$\leq 0,05$
Karkea hiekka	$10^{-1} \dots 10^{-4}$	0,03...0,3
Soramoreeni	$10^{-4} \dots 10^{-7}$	1...2
<u>Kohtalaisesti läpäisevät</u>		
Hieno hiekka	$10^{-3} \dots 10^{-6}$	0,3...3
Karkea siltti	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	0,3...4
Hiekkamoreeni	$10^{-6} \dots 10^{-8}$	1...6
Silttimoreeni	$10^{-7} \dots 10^{-10}$	2...6
<u>Läpäisemättömät</u>		
Hieno siltti	$10^{-5} \dots 10^{-8}$	3...10
Savi	$10^{-8} \dots 10^{-10}$	> 10

Kuvassa 2 on esitetty yleisen käytännön mukaiset eri maalajeille soveltuvat pohjaveden alentamismenetelmät. Kuitenkin käytännössä edetään halvimasta kalliimpaan menetelmään.



Kuva 2. Eri pohjaveden alentamismenetelmien käyttöalueet maalajista riippuen (Liikennevirasto 2013)

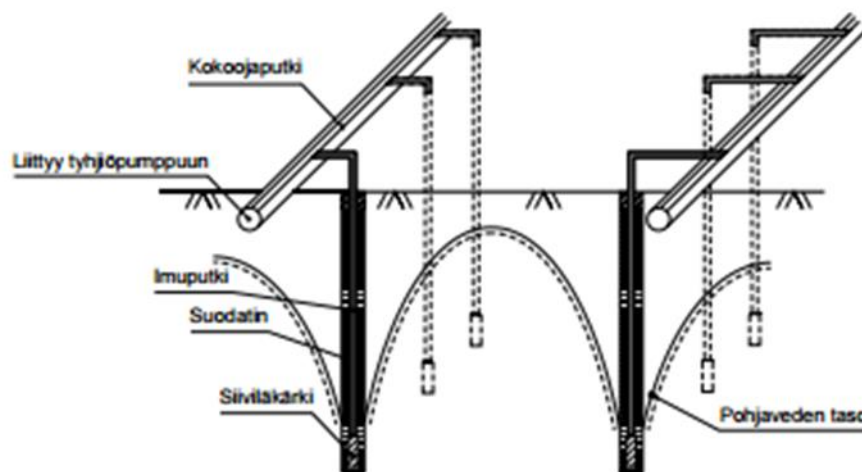
Jos vedenläpäisevyyden kerroin on $\geq 10^{-3}$ m/s ja kaivantoon voidaan sallia lyhytaikainen virtaus, optimaalisinta on käyttää kuvan 1 mukaisia pumppauskuoppia ja -kaivoja. Jos läpäisykerroin on $\geq 10^{-4} - 10^{-5}$ m/s, voidaan käyttää pumppausputkia. Tällöin kyseessä on maalajeista sora, hiekka ja sora-moreeni. Yksinkertaisimmillaan tällainen on alapäästään rei'itetty teräsputki, mutta huomattavasti tehokkaampi on suodatimmella varustettu kuvan 3 mukainen pumppausputki. Teräsputken ollessa kyseessä se sijoitetaan 2,0 – 5,0 metriä kaivannon pohjatason alapuolelle, mutta ei kuitenkaan tukiseinän alapään alapuolelle. Putkeen painovoimaisesti virtaava pohjavesi poistetaan putken pohjalle laskettavalla uppopumpulla tai keskipakopumpulla. Tämä ratkaisu on tehokas vain hyvin vettä johtavissa maalajeissa. Lisäksi järjestelmä liettyy helposti tukkoon. Toimivampi ratkaisu on kuvan 3 suodatimmella varustettu pumppausputki. Se rakennetaan teräksisen työputken avulla, mikä porataan tai juntataan suunniteltuun syvyyteen. Työputkeen asennetaan pumppausputkeksi rei'itetty muoviputki tai suuri salaojaputki. Pumppausputki verhotaan suodatinkankaalla. Pumppausputken ja salaojaputken väli täytetään salaojasoralla, jonka jälkeen työputki nostetaan ylös. (RIL 263-2014)



Suodattimella varustettu pumppausputki

Kuva 3. Suodattimella varustettu pumppausputki. (RIL 263-2014)

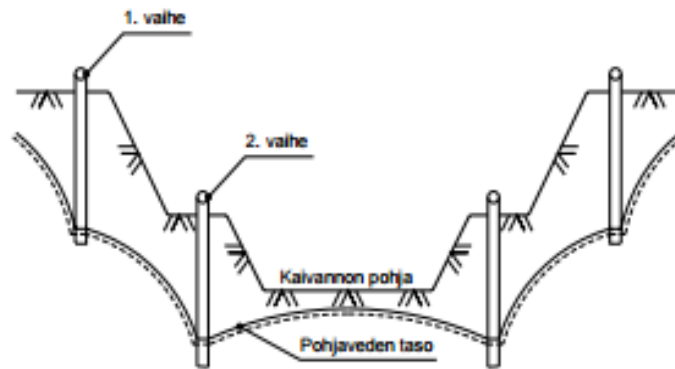
Vedenläpäisykertoimen ollessa $\geq 10^{-6} - 10^{-7} \text{ m/s}$ on tehokkain pohjavedenalennusmenetelmä tyhjiöpumppaus. Kyseeseen tulevat maalajit ovat hieno hiekka, karkea siltti sekä sora- ja hiekkamoreeni. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 4. Siinä tyhjiöpumput imevät järjestelmään alipaineen, jolloin pohjavesi imeytyy siiviläkärkisten imuputkien kautta kokoojaputkiin ja edelleen pumppujen vesisäiliöihin. (RIL 263-2014)



Tyhjiöpumppausmenetelmä

Kuva 4. Tyhjiöpumppausmenetelmän periaatekuva. (RIL 263-2014)

Pumput sijoitetaan kaivannossa mahdollisimman alas, sillä pumppauksen teho on kääntäen verrannollinen pumpun ja pohjavedenpinnan korkeuseroon. Jos pohjaveden alennustarve on yli kuusi metriä, se tulee toteuttaa kaksivaiheisena kuvan 5 mukaisesti. (RIL 263-2014)

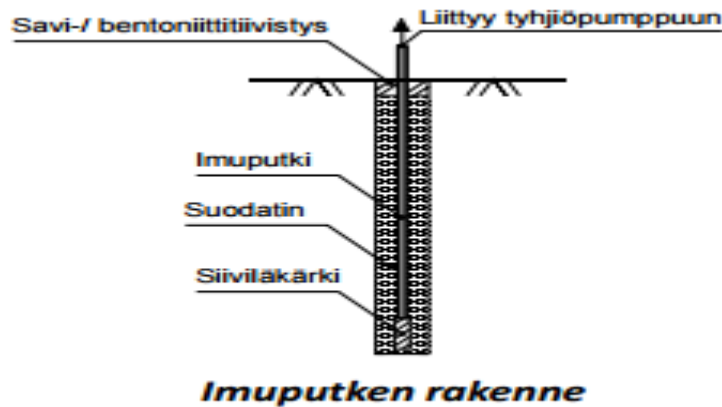


Kaksivaiheinen pohjavedenalennus tyhjiöpumppausjärjestelmällä

Kuva 5. Kaksivaiheinen pohjavedenalennus, kun alennustarve on yli kuusi metriä. (RIL 263-2014)

Imuputket sijoitetaan kuvan 4 mukaisesti 2 – 5 metrin välein kaivannon reunoille. Laajoissa kaivannoissa imuputkia tulee sijoittaa myös kaivannon keskelle. Kuitenkin aina niin, että ne häiritsevät rakennustöitä mahdollisimman vähän. Siivilän kärjen tulee sijoittua parhaiten vettä johtavaan maakerrokseen siten, että siivilän alapää on vähintään metrin pohjavedenpinnan suunnitellun alennustason alapuolella. (RIL 263-2014)

Imuputken rakenneperiaate on kuvattuna kuvassa 6. Menetelmän tehoa kasvattaa entisestään suodatinkerros imuputken ympärillä sekä maapohjan tiivistäminen ilmatiiviiksi imuputken yläpäässä. Imuputket pystytään asentamaan hyvin vaativiin, lohkaraisiin ympäristöihin poraamalla asennettavaa työputkea käyttäen. (RIL 263-2014)



Kuva 6. Imuputken rakenneperiaate. (RIL 263-2014)

Syvissä kaivannoissa pohjaveden alennus voi olla tarkoituksenmukaista tehdä vaiheittain kaivutöiden vaiheistukseen koordinoituna. Pohjavedenpinnan alennus aloitetaan pumpausputkilla. Kun niiden teho ei enää riitä, asennetaan tyhjiöpumppausjärjestelmä. Tämä voidaan tehdä myös kuvan 5 mukaisesti kahdella tyhjiöpumppausjärjestelmällä. (RIL 263-2014)

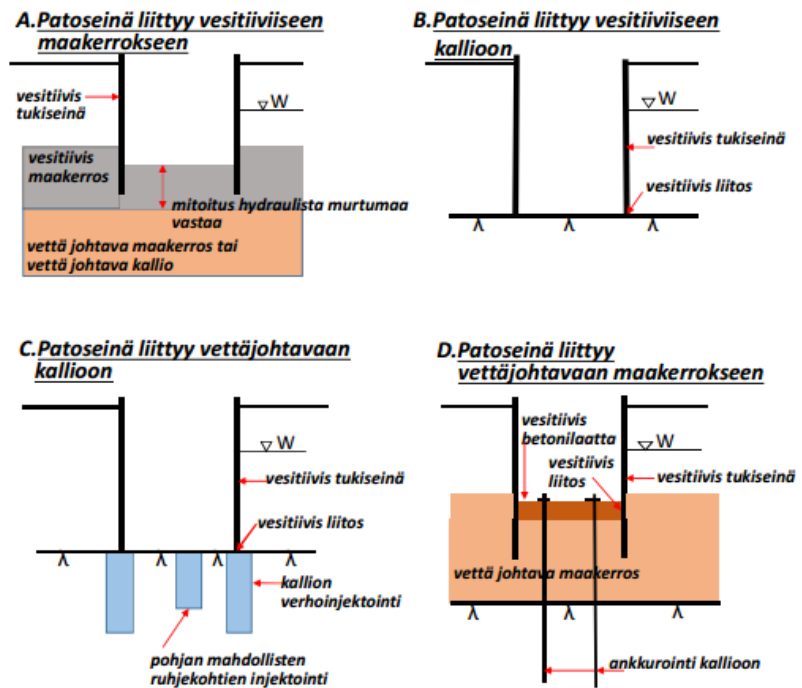
2.3 Kaivannon kuivanapito katkaisemalla veden virtausyhteys

2.3.1 Menetelmän perusperiaate

Veden virtausyhteys maakerrosten kautta kaivantoon katkaistaan patoseinällä. Patoseinä on vesitiivis tukiseinä, jonka alapää upotetaan vettä läpäisemättömään pohjakerrokseen tai ehjään kallioon. Virtausyhteys kaivantoon kalliopohjan kautta katkaistaan verhoinjektoimalla kallio patoseinän alta tai upottamalla patoseinä riittävästi kallioon. Kaivannon pohjan hydraulisen murtuman riski tulee arvioida aina, kun kaivutaso alittaa pohjaveden painetason. (RIL 263-2014)

Kuvassa 7 A patoseinä eli vesitiivis tukiseinä on upotettu vesitiiviiseen maakerrokseen. Jos vesitiiviin maakerroksen alla on vielä vettä johtava maakerros tai kallio, vesitiiviin maakerroksen paksuuden tulee olla riittävä estämään nosteen aiheuttama kaivannon pohjan murtuminen. Kaivannon pohjan hydraulinen murtuminen voi tapahtua myös kalliossa olevan hyvin vettä johtavan vyöhykkeen kautta. Kuvassa 7 B patoseinä liittyy vesitiiviisti tiiviiseen kallioon ja kuvassa 7 C vettä johtavaan kallioon. Jälkimmäisessä tapauksessa RIL 263-2014 Kaivanto-ohjeen mukaan kallio tulee verhoinjektoida patoseinän alta. Lisäksi kalliopohjan ruhjekohdat injektoidaan tarvittaessa. Kuva 7 D esittää erikoistapausta, jossa kaivannon pohjan vesitiiveys toteutetaan kallioon ankkuroidulla betonilaatalla. Tällöin kaivannon kaivu, betonilaatta ja sen ankkurointi tehdään vedenalaisena työnä. (RIL 263-2014)

**Veden virtausyhteyden
katkaiseminen
kaivantoon,
perustapaukset**



Kuva 7. Vesitiiviin kaivannon periaateratkaisuja erilaisissa pohjaolosuhteissa. (RIL 263-2014)

Kallion verhoinjektointi voidaan tehdä joko ennen kaivua (esi-injektointi) tai sen jälkeen (jälki-injektointi). Työmenetelmän valinta tulee perustua riittävään pohjatutkimustietoon. Valintaan vaikuttavat mm. kallion vedenjohtavuus, pohjaveden painetaso sekä pohjavesialueen laajuus, johon kaivanto on virtausyhteydessä kallion kautta. Vaativissa olosuhteissa verhoinjektointi tulee tehdä esi-injektointina maanpinnalta, jolloin jälki-injektointiin liittyvät riskit vähenevät. Jälki-injektointiin liittyviä riskejä ovat:

- injektoinnin epäonnistuminen veden virtaustilan vuoksi
- kaivannon vesitiiveyden epäonnistuminen suuren vesivuotomäärän vuoksi
- ympäristön pohjavesitason laskeminen alle sallitun tason
- kaivamisen aikainen hydraulinen murtuminen. (RIL 263-2014)

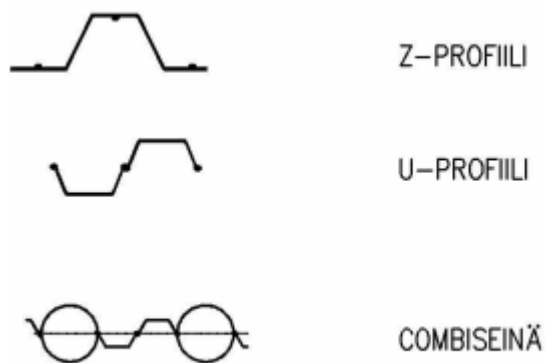
Suomessa yleisimpiä tai yleistymässä olevia tapoja rakentaa vesitiiviitä tukiseiniä ovat: teräsponttiseinä, porapaaluseinä, suihkuinjektoitu seinä, porapaalu-suihkuinjektoitu seinä, kaivinpaaluseinä sekä teräsbetonisesta valulohkoista koostuvasta patoseinä eli kaivantoseinä. Tukiseinätyypin valinta perustuu seuraaviin tekijöihin:

- kaivannon pohjaolosuhteet
- kaivannon ympäristöolosuhteet
- tukiseinän käyttötarkoitus

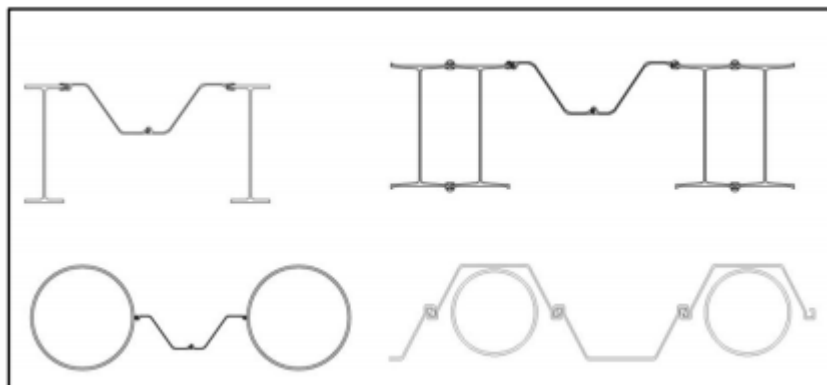
- eri tukiseinätyyppien ominaisuudet
- eri tukiseinätyyppien rakennuskustannukset ja tarvittava rakennusaika. (RIL 263-2014)

2.3.2 Teräsponttiseinä

Teräsponttiseinä muodostuu maahan lyömällä tai täryttämällä upotettavista teräsponteista, jotka liittyvät toisiinsa lukkoprofiilein muodostaen yhtenäisen seinärakenteen. Teräspontteja on erilaisia poikkileikkausprofiileja, yleisimpinä Suomessa ovat kuvassa 8 esitetyt U- ja Z-profiilit. U-profiilit liittyvät toisiinsa seinän neutraaliakselilla, Z-profiilit seinän ulkosivuilla. Teräsponttiseinän taipuessa maanpaineen vaikutuksesta U-profiilit voivat luistaa toistensa suhteen, kun pohjamaa on pehmeää savea tai löyhää hiekkaa. Z-profiilin teräsponteissa ei ole tätä riskiä. Suurta jäykkyyttä vaativa tukiseinä voidaan rakentaa kuvan 9 mukaisesti combiseinä, jossa teräsponttien väleihin liitetään putkipaaluja tai palkki- tai koteloprofiileja. (RIL 263-2014)



Kuva 8. Erilaisia vesitiiviin teräsponttiseinän profiileja. (RIL 263-2014)



Kuva 9. Erikoisponttiprofiileja suurta jäykkyyttä vaativiin tukiseiniin. (ArchelorMittal 2010)



Kuva 10. Tyypillinen Z-profilin teräsponttiseinä sekä kuvan vasemmassa laidassa teräsponttiseinän ja porapaaluseinän liitos.

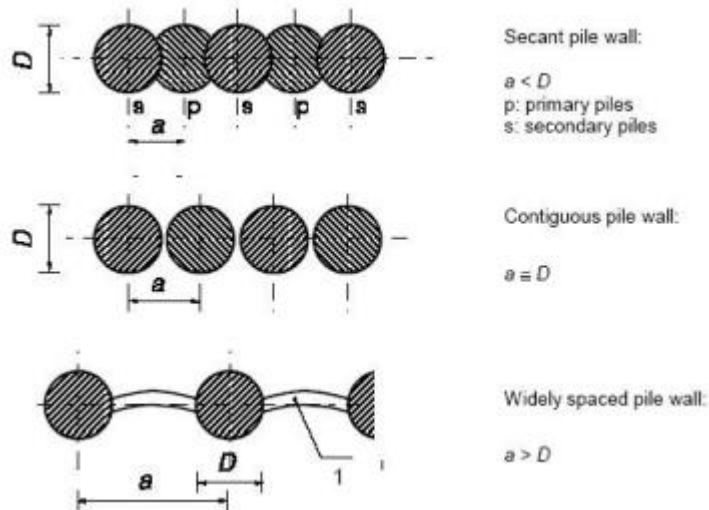
Kuvan 10 mukainen teräsponttiseinä on yleisin käytössä oleva tukiseinä. Se on kustannustehokas, asennuskalustoa on yleisesti saatavilla ja se on nopea asentaa sekä purkaa. Menetelmän käyttöä kuitenkin rajoittaa se, että se ei sovellu kiviseen tai lohkaraiseen maaperään, eikä hyvin tiiviiseen, karkeaan kitkamaakerrokseen. Tällaisiin maakerrokksiinkin asennus on periaatteessa mahdollista löyhdyttämällä maaperää poraamalla tai räjäyttämällä sekä suorittamalla välppäyskaivuja, mutta tällöin kokonaiskustannukset nousevat yleensä liian suuriksi. Käytön rajoituksina on otettava myös huomioon, että pontitus, sekä lyömällä että täryttämällä, aiheuttaa maapohjaan tärinää, joka puolestaan aiheuttaa erityisesti löyhässä tilassa oleviin kitkamaakerrokseen tiivistymistä ja painumista ja näin ollen ympäristölle haittoja. (RIL 263-2014)

RIL:n Kaivanto-ohje toteaa teräsponttiseinän olevan vesitiivis kaivannon pohjatason yläpuolella, kun se on huolellisesti suunniteltu ja tehty. Teräsponttiseinän lukkoliitos ei ole sellaisenaan vesitiivis. Vesitiiveys riippuu maapohjan vedenläpäisevyydestä ja vedenpaine-erosta seinän eri puolten välillä. Jos maapohjan vedenläpäisevyys on pieni, eli toisin sanoen maaperä koostuu hienoainespitoisesta maasta, ja vedenpaine-ero seinän eri puolten välillä on kohtuullinen, vuotoveden mukana kulkeutuva hienoaines tukkii yleensä lukkoliitokset. Näissä olosuhteissa teräsponttiseinä on yleensä riittävän vesitiivis työnäikaisena tukiseinä. Lukkoliitosten itsekseen tapahtuva tukkeutuminen vähenee, kun maapohjan vedenläpäisevyys tai paine-ero seinien välillä kasvaa. Karkearakeisissa maissa tai avovesiolosuhteissa tukkeutumista ei tapahdu lainkaan. Silloin tukkiminen on tehtävä keinotekoisesti. Lukkourat täytetään tiivistysmassalla ennen ponttien asentamista. Pysyvässä ponttiseinässä kaivannon pohjatason yläpuolisen seinäosan vesitiiveys voidaan varmistaa lisäksi hitsaamalla ponttiliitokset umpeen. Vuotavissa ponttiliitoksissa voidaan lisäksi hitsata teräslevy liitoksen eteen ja vielä tarvittaessa injektoida teräslevyn ja pontin väli. (RIL 263-2014)

Vesitiiveyden ongelmaksi muodostuu teräsponttiseinän alapään liitos kallioon. Vesivuodon rajoittamiseksi on olennaisen tärkeää, että pontit upotetaan kalliopintaan kiinni. Tällöinkin pääosa pontin leveydestä on irti kallioista, koska kalliopinta on luonnollisesti aina epätasainen. Jälkitiivistys riippuu kalliopintaa peittävän maakerroksen vedenjohtavuudesta ja vedenpaineesta. Yleensä jälkitiivistyksessä ponttien alapäihin hitsataan rakojen kohdille teräslevykappaleita ja sen jälkeen tiivistetään taustoja nopeasti reagoivalla polyuretaanilla. Lopputiivistys voidaan viimeistellä betonisella juuripalkilla. Palkin valua voidaan helpottaa asentamalla palkin pituussuuntainen salaoja, jolla vuotovedet kootaan ja johdetaan pois häiritsemästä valua. Palkin lujittumisen jälkeen salaoja injektoidaan umpeen. Juuripalkin tehoa voidaan parantaa asentamalla kallioseinäpinnalle sekä tukiseinäpinnalle bentoniittinauhat ja injektointiletkut. Letkujen avulla rajapinnat injektoidaan jälkikäteen tiiviiksi. Erittäin vaativissa olosuhteissa tiivistys tehdään suihkuinjektoinnilla. Pilarit injektoidaan kalliopinnasta ylöspäin limittäen ne teräsponttien alapäiden kanssa vähintään metrin. (RIL 263-2014) Luvussa 9 ilmenee, miten suihkuinjektoinnin ulottaminen kallioon jakaa mielipiteitä; toisten mielestä se on hyödytöntä, toisten mukaan välttämätöntä, varsinkin ruhjeisen kalliopinnan ollessa kyseessä (haastattelututkimus, luku 9). Tiivistykseen voidaan käyttää myös maainjektointia edellyttäen, että maa-aines on injektoituvaa ja sille löytyy soveltuva injektointiaine (RIL 263-2014).

2.3.3 Kaivinpaaluseinä

Kuvan 11 mukaisesti kaivinpaaluista voidaan tehdä kantavan rakenteen lisäksi maan- ja vedenpainetta kestävä patoseinä. Pohjaolosuhteista riippuen kaivinpaaluseinä tehdään toisia leikkaavilla tai sivuavilla kaivinpaaluilla tai rakentaen paalujen väliin erillinen seinärakenne kuten kuvassa 11. Jos paalut limitetään, yleensä rakennetaan ensin joka toinen raudoittamaton paalu, jonka jälkeen tehdään väleihin raudoitetut paalut. Rakenne on myös mahdollista tehdä niin, että ensin rakennetaan vierekkäiset kaivinpaalut ja välit täytetään suihkuinjektointipilareilla. (Asikainen 2009)



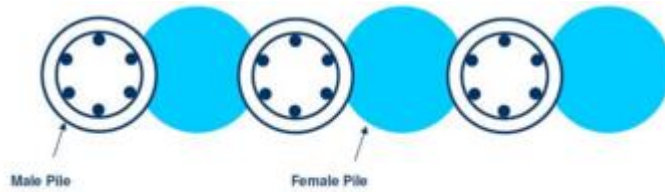
Kuva 11. Kaivinpaaluseinän vaihtoehtoisia rakennustapoja. (Asikainen 2009)

Kaivinpaalujen käyttöä rajaa Kaivanto-ohjeen mukaan lohkareinen maa sekä hyvin pehmeä savi (RIL 263-2014). Kuitenkin kaivinpaalutusta koskevassa diplomityössään Asikainen toteaa, että Suomessa kaivinpaaluja pystytään tekemään lohkareiseenkin mahaan, varsinkin kahmarikauhamenetelmällä. Käytännössä se vaatii kuitenkin esiräjäytyksiä, mikä puolestaan korostaa sen toista huonoa puolta: pitkää rakennusaikaa. (Asikainen 2009)

Kaivinpaaluja voidaan tehdä myös Kelly bar -menetelmällä, jota kutsutaan myös rotaatiokairausmenetelmäksi, jossa kaivaminen suoritetaan kiertämällä tankoa, jonka alapäässä on kaivurasia. Kaivurasia leikkaa maata sisään, kun tankoa kierretään. Rasian tultua täyteen, se nostetaan maan pinnalle ja tyhjätyään. (Kemppainen 2006) Menetelmän haittapuolet ovat kuitenkin samat kuin kaivinpaalutuksessa tavallisella menetelmällä ja lisäksi lohkareinen maa on rajoittavampi kuin kahmarikauhamenetelmällä. (Asikainen 2009)

2.3.4 CFA-paaluseinä

CFA-paalu on pitkällä auger-kairalla tehtävä maata syrjäyttämätön paalu. Kairaa kierretään maahan, kunnes tavoitesyvyys saavutetaan. Tämän jälkeen lähdetään nostamaan kairaa samalla syöttäen betonia kairan varren läpi paalureiän pohjalle. Kun kaira on nostettu kokonaan ja betonointi suoritettu, painetaan raudoituskehikko paikoilleen. (Kemppainen 2006) Markkinoilla on myös seiniä, jossa joka toinen on raudoitettu urospaalu ja joka toinen raudoittamaton naaraspaalu, kuten alla havainnekuvassa 12 sekä todellista seinää esittävässä kuvassa 13.



Kuva 12. Leikkaava CFA paaluseinän variaatio. (Rockal 2015)

Menetelmä on edullinen ja tehokas ja laajalti käytössä muualla Euroopassa. Se ei sovellu juuriseen, kivikkoiseen tai lohkaraiseen maaperään tai pehmeille savikerroksille, minkä vuoksi se ei ole yleistynyt Suomessa. (Yatskevich 2010)



Kuva 13. CFA paaluseinä 900mm halkaisijaltaan olevilla raudoitetuilla urospaaluilla paaluilla ja 600mm halkaisijaltaan olevilla naaraspaaluilla. (Avopiling)

2.3.5 Kaivantoseinä

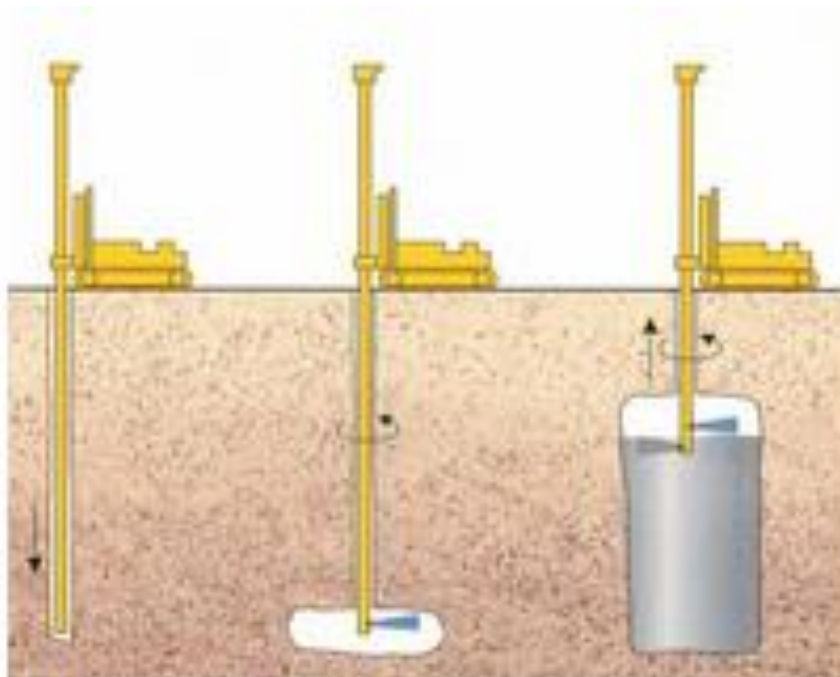
Kaivantoseinä on teräsbetoninen valulohkoista koostuva patoseinä. Kaivanto pidetään bentoniittilietteellä täytettynä ja kaivu tehdään valulohko kerrallaan. Bentoniittiliete tukee kaivantoa sekä estää pohjaveden virtauksen kaivantoon. Yleisin käytetty menetelmä on kaivaa kahmarikauhalla, mutta erittäin suurissa kohteissa voidaan käyttää ns. ”Hydrofraise” -menetelmää. Siinä kaivu tehdään pyörivillä leikkausterillä ja maa kuljetetaan ylös bentoniittilietteen avulla. Raudoitus asennetaan lietteeseen esivalmistettuina kehiköinä ja valu tehdään vedenalaisena valuna lohko kerrallaan. Seinän vesitiiveyttä voidaan parantaa asentamalla lohkojen saumoihin tiivistysnauhat. Menetelmällä on mahdollista tehdä myös suurläpimittaisia paaluja. (RIL 263-2014)

Kaivantoseinä on hyvin yleisesti käytetty patoseinätyyppi Keski- ja Itä-Euroopassa sekä muualla maailmassa. Sen käytön esteenä on toisien lähteiden mukaan kivisyys ja sen sanotaan soveltuvan lähinnä kivettömiin hiekka- ja silttimaihin. (RIL 263-2014) Kuitenkin useiden lähteiden mukaan kaivantoseinä on täysin rakennettavissa myös koviin, jopa kiviseen maaperään. Tällöin vain kustannukset lähtevät nousemaan usein liian suuriksi. Lisäksi rakentaminen on hidasta ja erikoiskalustoa vaativaa. Kuitenkin kohteissa, joissa esimerkiksi lähellä olevien rakennusten takia vaaditaan ehdotonta vesitiiveyttä ja pohjaveden kaikenlainen aleneminen on kielletty tai maaperässä ei saa tapahtua minkäänlaista liikettä, kaivantoseinä on täysin vesitiiviinä ja lähes liikkumattomana rakenteena varmin. (Rantamäki & Tammirinne 1996, Perkkiö 2009)

Varsinaisia kaivantoseiniä ei ole juurikaan ole rakennettu Suomessa enää 1980-luvun jälkeen suurten kustannusten vuoksi (RIL 263-2014). Kuitenkin yhdistettyjä rakenteita on toteutettu. Esimerkiksi Kalasatamassa porapaaluseinän sisään on rakennettu betoninen kaukalarakenne, joka toimii vesitiiviinä betonirakenteena sekä samalla ulkoseinänä kaivantoseinän tapaan, mutta kallioliitos on hoidettu porapaaluseinällä.

2.3.6 Suihkuinjektoitu seinä

Suihkuinjektointi nimitys viittaa injektointiin. Nimitys on sinänsä harhaanjohtava, sillä menetelmällä aikaansaattava rakenne muodostuu täysin eri tavalla kuin injektoitu. (Viitala 1993) Suihkuinjektoinnissa korkeapaineisella suihkulla leikataan ja osin syrjäytetään maakerros, sekoittaen siihen samalla suihkutettava vesi-sementtisuspensio. (Finnsementti 2015) Maan hienoaines purkautuu lietteenä maanpinnalle korvautuen sementillä. (RIL 263-2014) Menetelmä rikkoo maaperän alkuperäisen rakenteen vaikutusalueellaan täysin. Injektointi puolestaan vain tiivistää maaperän huokosia matalan paineensa vuoksi. (Viitala 1993) Suihkutus tehdään maahan porattujen tankojen kärkiosassa sijaitsevien suuttimien kautta. Suihkua pyörittämällä ja nostamalla saadaan aikaiseksi maabetonilieriö kuvan 14 mukaisesti. (Finnsementti 2015)



Kuva 14. Suihkuinjektoinnin työvaiheet. (Finnsementti 2015)

Suihkupaalun ominaisuudet eivät ole standardoitavia vakioita vaan ne joudutaan käsittelemään rinnan niihin vaikuttavien tekijöiden kanssa. Suihkupaalun ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat: maaperätekijät, pohjavesi, sideaine, laitteistovalinnat sekä työn suoritustapa. Maaperäominaisuuksista vaikuttavat maalaji, lujuusominaisuudet, tiiviys, kiven ja lohkareiden osuus, maaperän esteet sekä epäpuhtaudet, varsinkin humus ja rikki. Pohjavesiominaisuuksista on huomioitava taso ja virtaukset. Sideaineessa vaikuttavat sementtipitoisuus, toisin sanoen vesi-sementtisuhde sekä sideaineen laatu ja määrä. Laitteistovalinnoissa on otettava huomioon suihkutuksen menetelmä, onko se 1, 2 vai 3 -faasinen, suihkun nopeus ja paine sekä suuttimen/suuttimien määrä ja kaltevuus ja pumppausnopeus. Työn suorituksessa on huomioitavaa suuttimen nosto- ja pyöritysnopeus. (Viitala 1993) Tärkeimpiä itse rakenteen ominaisuuksia ovat paalun lujuus ja läpimitta. Ne korreloivat myös vesitiiveyden kanssa.

Koska suihkupaalun tärkeimpiin ominaisuuksiin, lujuuteen ja läpimittaan, vaikuttavat maaperäolosuhteet, asettaa se pohjatutkimuksille erityisiä vaatimuksia työn onnistumiseksi. Urakoitsijalle on selvitettävä maalajikerrokset, kallion ja pohjaveden pinta sekä pohjaveden mahdollinen virtaus. Havaituista maalajeista tulisi kutakin kuvata rakeisuus-käyrillä ja kitkamaalajeista kuvata kitkakulma ja suhteellinen tiiveys sekä koheesiomaalajeista suljettu leikkauslujuus. Lisäksi on tärkeää huomioida esiintyykö humusta, orgaanisia jätteitä tai betonin korroosiota aiheuttavaa rikkiä. Myös lohkareisuuden ja kivisyyden määritykset ovat välttämättömiä. Kaiken tämän selvittäminen vaatii paljon kairauksia, mutta on edellytys työn onnistumiselle. Lisäksi on otettava huomioon Suomessa toki harvinainen paisuvien savien esiintyminen, joka yksistään voi vaarantaa koko työn on-

nistumisen. Yleensä urakoitsijat suihkuttavat varman päälle varsinkin vaativissa rakenteissa ja käyttävät huonoimman mahdollisen maaperän parametreja. (Viitala 1993) Rakenteen on oltava kauttaaltaan onnistunut, jotta se täyttää vesitiiveysvaatimukset.

Suihkuinjektoitu seinä on vetojännitystä kestävä rakenne. Se ei myöskään kestä jäätymistä. Jos sen läpi virtaa vuotoa, tulee sen pääsy salaojaverkostoon estää, koska kalkki saostuu tukkien koko verkoston. Suihkuinjektoitu seinä on huolellisesti suunniteltu ja tehtynä vesitiivis. Tällöin rakenne tehdään aina toisiaan leikkaavilla paaluilla kuten kuvassa 15. Rakenne sopii lisäksi oikeastaan kaikkiin maalajeihin; eloperäisissä maalajeissa ja pehmeässä savessa onnistuminen vaatii kuitenkin erityistoimenpiteitä. Maapohjassa ei saa tapahtua pohjaveden virtausta pilarien lujittumisen aikana tai rakenne ei onnistu. Suuria lohkaraita sisältävässä maaperässä rakenteesta tulee epähomogeeninen, ts. lohkaraitien taakse muodostuu yleensä katve, johon pilaria ei muodostu. (RIL 263-2014)



Kuva 15. Suihkuinjektoidun vesitiiviin seinämän periaate toisiaan leikkaavilla suihku-paaluilla. (RIL 263-2014)

Kaivannoissa suihkuinjektointin yleisin käyttökohde on yhdistelmärakenteena tiivistä-mässä teräsponttiseinän ja kallion väliä vesitiiviiksi, tai jos pontteja ei ole saatu kallioon saakka, niin tämän välin tukiseinärakenteena. Lisäksi suihkuinjektointia käytetään yhä kasvavimmissa määrin yhdistelmärakenteena porapaalujen sekä kaivinpaalujen kanssa. (RIL 263-2014) Suihkuinjektointipilarin vedenläpäisevyys on noin $k = 10^{-6} - 10^{-9} m/s$. Suihkuinjektointipilari on siis käytännössä vettä läpäisemätön. (Savola 2004)

Työn riskit aiheutuvat kompressoreilla maaperään päätyvän ilman hallitsemattomasta käyttäytymisestä sekä paluulietteen karkaamisesta. Onnistuessaan ilmanpaine pitää tango vierustaa pitkin purkautuvan paluuvirran kulkureitin hyvin auki ja vähentää painetaskun muodostumisriskiä ympäristössä. Ilmanpaineen kasvaessa suuremmaksi kuin vedenpaine alkaa maan huokosissa oleva ilma syrjäyttää vettä. Maakerrokseen syntyy veden ja ilman virtaustila. Virtaustilassa vesi-ilma seos kuljettaa mukanaan hienoainesta löyhdyttään maata. Seurauksena saattaa olla hydraulisen murtumisen kaltainen ilmiö. Se voi esimerkiksi söräyttää läheisen kaivannon, tai painetila saattaa purkautua geysirin tavoin maanpintaan tai lähellä sijaitseviin maanalaisiin tiloihin vedenpaineen ylittäessä vedenieristyksen paineenkeston. Paineilma saattaa myös löyhdyttää maata perustusten alla tai vaihtoehtoisesti muodostaa haitallisia painetaskuja. Saksassa on myös raportoitu suihku-tuksen jälkeen kuukausien viiveellä tapahtuvia jälkinousuja. Taloudellisesti kalliiksi tulee

myös sementtilietteen kulkeutuminen ja kovettuminen väärään paikkaan, esimerkiksi saloihin tai viereisten rakennusten lattialaattojen alle nostaen ne ylös. Riski tähän kasvaa, jos läheisyydessä on helposti vettä johtavia täyttyjä. (Viitala 1993)

2.3.7 Porapaaluseinä

Porapaaluseinää suositellaan erityisesti kohteisiin, joissa:

- Maassa on vaikeasti läpäistäviä esteitä kuten kiviä, lohkareita tai vanhoja perusrakenteita. Metalliromuesteet kuitenkin vaurioittavat porakruunun, joten kaikki esteet eivät ole menetelmällä läpäistävissä.
- Paalutustyö tehdään ahtaassa, matalassa tilassa tai alueella, jossa tiukat rajoitukset paalutuksen ympäristövaikutuksille, kuten tärinälle, maaperän painumille ja siirtymille.
- Patoseinä halutaan saada varmasti kallioon, kun kalliopinta on esimerkiksi vino tai kalliopinta on lähellä maanpintaa.
- Seinälle on asetettu korkeat tarkkuus- ja laatuvaatimukset: porapaalutuksella pystytään hyvin tarkkoihin sijainti- ja kaltevuusvaatimuksiin. (RD-paalutusohje)

Patoseinä liittyy siis tässä tapauksessa kuvan 7 mukaisesti suoraan vesitiiviiseen tai vettä johtavaan kallioon riippuen olosuhteista. Porapaaluseinä ei ole Kaivanto-ohjeen mukaan itsessään vesitiivis rakenne eli patoseinä, vaan vesitiiveys tarvitsee seinän käyttöiän ja vuotovesirajoitusten mukaisesti erityistoimenpiteitä, joita on esitelty tarkemmin luvussa 3. (RIL 263-2014)

2.4 Esimerkkejä vesitiiviiden kaivantojen toteuttamisesta vaihtoehtoisilla tavoilla

Maailmalla käytetään pitkälti samoja, jo aiemmin lueteltuja Suomessakin yleisiä metodeja. AnheelerMittal kohde-esittelyistä löytyy runsaasti keskieurooppalaisia, jopa intialaisia ja yhdysvaltalaisia, kohteita, joissa jopa 30 metrin kaivantoja on tuettu teräsponteilla. Vesitiiveys lukoissa on varmennettu Beltan bitumoinnilla tai tiivistyshitsaamalla lukot. Varsinkin pysyvissä rakenteissa käytettiin tiivistyshitsausta. Yhdysvalloissa teräsponsittiseinä esiintyi työnaikaisissa seinissä ja pysyvissä rakenteissa suosittiin betonia kaivantoseiniä. (ArcelorMittal) Tässä luvussa esitellään vesitiiviiden seinien rakentamista muutamilla vaihtoehtoisilla tavoilla.

2.4.1 Pasilan Tripla – vibraamalla ja poraamalla asennettava porapaaluseinä

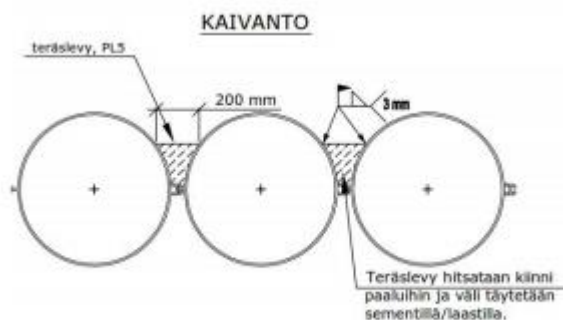
Pasilan Tripla on YIT Rakennus Oy:n suurhanke. Se on kolmen korttelin kokonaisuus, johon kuuluu kauppakeskus, pysäköintilaitos, joukkoliikenneasema, asuntoja, hotelleja ja toimistoja. (Tripla by YIT)

Pasilan ratapihalle tehtävän kaivannon mitat ovat 230m x 110 m ja syvyys 18 – 21 metriä. Kaivannolle asetettu vesitiiveysvaatimus on 60 l/ min ja porapaaluseinän mitoitusikä on 200 vuotta. (Tyynelä 2016)

Triplassa maanpinta on tasolla +15 ja pohjavedenpinta tasolla +14. Pintaosa maaperästä on osin louheista täyttöä. Täytön alla on turvetta, liejuista savea ja savea. Myös sulfidisia esiintyy. Pohjalla sijaitsee moreenia, jonka alla on tasoltaan huomattavasti vaihteleva kallionpinta. Osa kallioperästä on ruhjeista. Syvimmillään kallionpinta on 32 metrin syvyydellä maanpinnasta. (Tyynelä 2016)

Kohteen patoseinäksi oli vaihtoehtoina RD-paaluseinä, kaivinpaaluseinä leikkaavilla paaluilla sekä combiseinä toteutettuna kaivinpaaluilla ja suihkuinjektoinneilla. RD-paaluseinään päädyttiin sen asennusvarmuuden, paalujen liitoskohdan tunnettavuuden, homogeenisen rakenteen, konsolien ja palkkien kiinnityksen vuoksi sekä RD-paalujen varman saannin kallioon ja pienimmän aikatauluriskin vuoksi. RD-paaluseinän haittapuolina suunnittelija Tyynelä piti: Vaihtelevaa kallionpintaa, joka vaikuttaisi lukkopituuksiin. Korroosion vaikuttamista varsinkin teräsrakenteeseen, koska alueella on sulfidisia. Rakenteella on kaivinpaalua pienempi jäykkyys ja ankkurien läpivienti on hankalampaa sekä kalliimpaa. Myös lukon tiiviys huoletti, sillä vaikeimmilla korroosiovyöhykkeillä korroosion suurus on lähes yhtä suuri kuin lukon kokonaisainevahvuus. Lisäksi työn aiheuttamat painumat ympäristöön huolettivat. (Tyynelä 2016) Rakennuttajan työpäällikkö Vunneli puolestaan listasi huolenaiheiksi lukon vesitiiveyden, joka tulee varmistaa hitsauksin sekä suihkuinjektoinnein, teräskorroosion, maaperän häiriintymisen sekä poralietteen suuren määrän. (Vunneli 2016)

Seinän ensisijainen tehtävä oli toimia patoseinä, joka estää orsi- ja pohjaveden tunkeutumisen kaivantoon. Paalu itsessään betonoituna on ”vesitiivis”. Lukoille teetettiin TTY:lla vedenpainekokeita. Koska ympäristö oli niin voimakkaasti korroosiota aiheuttavaa, paaluväliin hitsattiin teräslevy ja levyn ja lukon väli täytettiin vielä sementillä kuvan 16 mukaisesti. Paalun alapään vesitiiveys varmistettiin suunnittelijan mukaan injektoinnilla lukkojen kautta, kallion ollessa lopullista kaivutasoa syvemmällä, tausta suihkuinjektoitiin ja koko patoseinälinjalle tehtiin vielä verhoinjektoinnit. Lisäksi ankkurikohdat suihkuinjektoitiin työnaikaisen vedentulon ehkäisemiseksi. (Tyynelä 2016)



Kuva 16. Triplan lukkojen vesitiiveyden ja korroosionkestävyyden varmistustoimet. (Tyynelä 2016)

Triplassa käytetty työtapa on uusi Suomessa, mutta siis varsin yleinen maailmalla. Kohteessa käytetään kolmivaiheista asennusta, jossa paalu ensin tärytetään savi- ja hiekkakerrosten läpi, augeroidaan kärjen tasoon ja lopuksi porataan moreenikerrosten läpi 1,5 metriä kallioon. (Vunneli 2016) Putket upotettiin yksimittaisina, joten hitsausjatkoksia työmaalla ei tehty. Käytössä oli uppoporauksessa aukeava pilotti. Kohteessa suoritettiin paljon esikaivuita, joiden funktio oli poistaa pilaantuneet maat sekä maaperän esteet tärytysosuudelta ja korvata maat puhtailla kitkamailla. Porauksen päätteeksi putki ”loppulyötiin” kallioon uppoasaralla. (Pasanen 2016) Triplassa käytetyn, Suomessa uuden, työtavan eduiksi Vunneli totesi nestemäisen porauslietteen määrän olevan yli 50% pienemmän kuin tavallisella porausmenetelmällä ja tätä myötä suojaustarve on vähäisempi. Haittapuolena on, että kallionpinta on todella tiedettävä tarkkaan koko seinän matkalla sillä paalua ei pysty enää vaihtamaan, jos se lähtee nk. ”sukeltamaan” kuvan 17 tavoin ts. paalun nosto ei ole mahdollista kuten tavallisessa porausmenetelmässä on. (Vunneli 2016)



Kuva 17. ”Sukeltanut” porapaaluseinän paalu. (Pasanen 2016)

Huolet työn aiheuttamista painumista realisoituivat. Pasilankadulle oli aikoinaan tehty massanvaihto louheella ja porausta varten ei voitu tehdä uutta massanvaihtoa. Tämä tarkoitti sitä, että tärytystä ei voitu käyttää vaan paalut oli porattava perinteisellä menetel-

mällä. Vaikka patoseinän etäisyys lähimpään raitiovaunukiskoon oli 12 – 13 metriä, poraus aiheutti kiskon laatalle noin 30 metrin matkalle maksimissaan 30 mm painuman sekä maksimissaan 40 mm:n siirtymän. Lisäksi viereiselle 2 – 3 metrin päässä olleelle ajoradalle syntyi 300 mm painumat. (Vunneli 2016)

Myös porauslietteen määrä muodostui ongelmaksi. RD-seinän Triplassa syrjäyttämä maatilavuus oli noin 7000 kuutiota. Porauslietettä kertyi paljon, kuten kuva 18 osoittaa. Erityisesti rikkonaiseen kallioon porattaessa perinteisellä menetelmällä pohjavedenpinnan alapuolella porauslietteestä muodostui ongelma. Lietteelle tehtiin altaita, joissa lietteeseen sekoitettiin kuivaa maata, jotta poiskuljetus työmaalta oli mahdollista. Kuitenkin tämä yhdistettynä pohjavedellä täyttyviin porapaaluihin aiheutti pohjavedenpinnan liiallisen laskemisen, jolloin Helsingin kaupungin valvonta velvoitti projektin ryhtymään keinotekoiseen pohjaveden syöttöön. (Tyynelä 2016, Vunneli 2016)



Kuva 18. Porauslietettä työmaalla. (Vunneli 2016)

Porapaalupäivillä kävi ilmi, että RM / RF -lukkojen kautta injektointi ei ollut onnistunut lainkaan. Paalujen betonointi IT-massalla oli tukkinut jo kontaktin. Suurella valupaineella tehty betonointi aiheutti massan nousemisen paalun ja kallioreiän väliin. Myös etukäteen lukkoihin tehtaalla asennettu bitumi sai kriittistä palautetta seminaariesityksessä. Kuvan 19 mukaisesti sitä oli kuoriutunut joka puolelle työmaata ja selvästi jäljelle jäänyt määrä arvelutti.



Kuva 19. Työmaalle kuoriutuneet lukkojen bitumitiivisteet (Vunneli 2016)

2.4.2 Bentoniittilieteseinät, membraaniseinät ja TRD

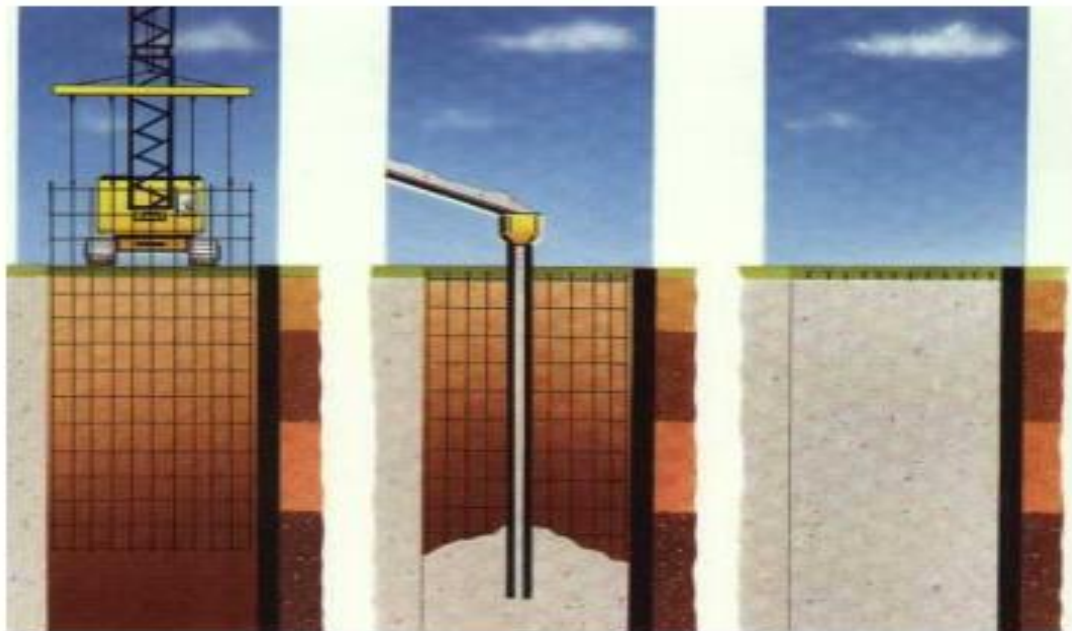
Molempia metodeja samaistetaan suihkupaalutukseen. Menetelmien tarkoituksena on muodostaa pinnanalainen seinämä, jossa on alhainen vedenläpäisevyys. Bentoniittilieteseinät ovat yleisiä Yhdysvalloissa. TRD on uudempi tulokas. (Evans 2008) Kappaleessa 2.3.5 esiteltiin kyseessä oleva kaivantoseinä.

Bentoniittilieteseiniä on rakennettu monilla tavoin. Rakennustyömailla Tokion teknologisen Instituutin mukaan yleisin tapa on rakentaa seinämä käyttämällä roikkuvaa kauhaa, joka on kuvattu kuvassa 20. Samalla kun kauhalla kaivetaan haluttuun syvyyteen, bentoniittiseos pumpataan stabiloimaan kaivanto. (Nemati 2005)



Kuva 20. Roikkuva kauha (Hang Grab), jolla rakennetaan bentoniittilieteseinä. (Nemati 2005)

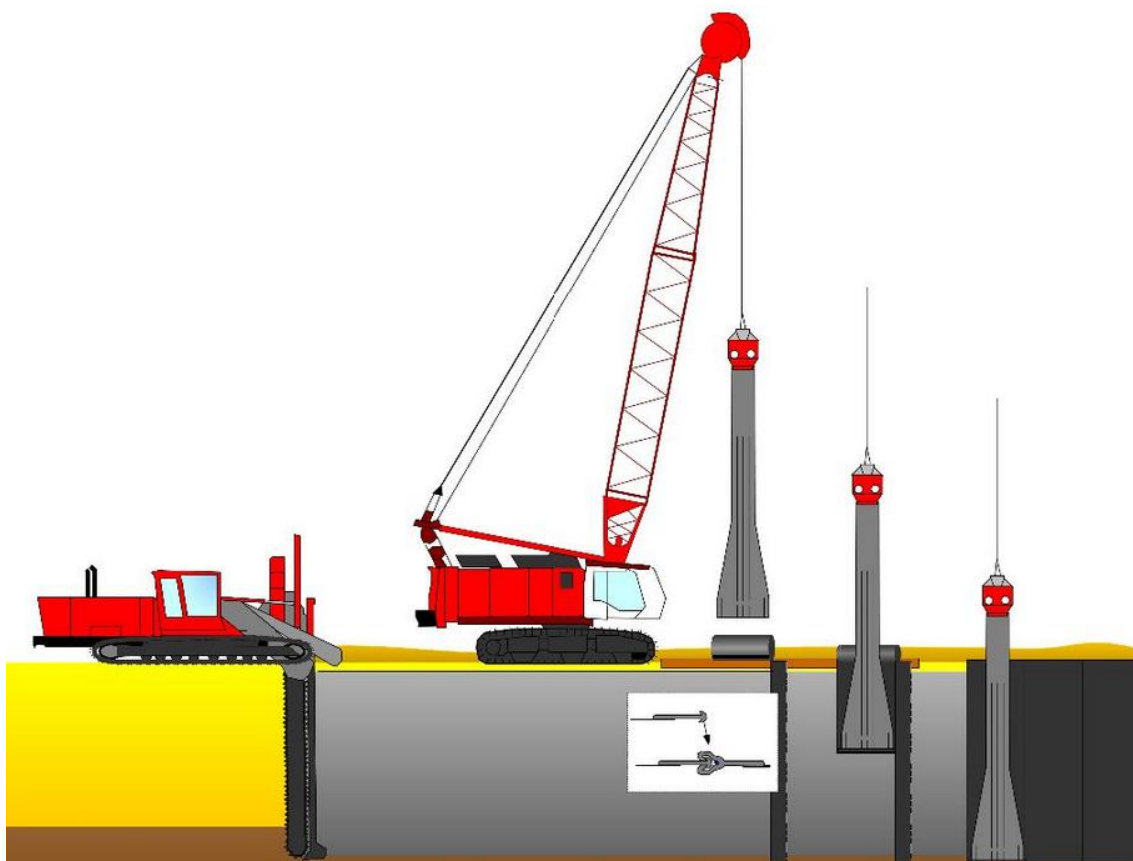
Seuraavaksi asetetaan kuvan 21 mukaisesti raudoite. Bentonitiä korvataan sementillä. Jokaisen paneelin väliin asennetaan PVC sauma. Menetelmällä saadaan kaivantoseinä.



Kuva 21. Seinä rakennetaan paneeli kerrallaan. (Nemati 2005)

Japanissa vuosikymmeniä käytetty, nyttemmin Yhdysvaltoihin levinnyt TRD metodi, jossa seinämä rakennetaan paikalla. Maata leikataan valtavalla moottorisahamaisella laitteella ja seinämän rakennusaineena käytetään käyttötarkoituksesta riippuen erilaisia yhdisteitä. Yleisin käytetty aines on bentoniittisaven ja sementin yhdistelmä. Samantapaista metodologia käyttäen seinämää on rakennettu myös erilaista muovikalvoista, kuona-aineista ja sepioliitista. (Evans 2008) Geoteknisiin erikoisratkaisuihin keskittynyt Keller on rakentanut metodilla kaivantoseiniä. (Keller)

Samantapaisella työskentelyllä voidaan asentaa myös kuvan 22 mukaista muovikalvoseinää. Suomessa tällaista on käytetty kaatopaikkarakenteissa pystyeristysseinänä mm. Kokkolassa, jossa urakoitsijana on ollut Destia. Isolla moottorisahamaisella laitteella oli leikattu maata, johon oli asennettu muovikalvo. Sito toimi projektin suunnittelijana. Siton suunnittelija kertoi, että lohkareet olivat menetelmälle todellisia ongelmia. Seinämää on pystytty asentamaan teräsponttivahvistuksin Joensuun Penttilän alueelle saviseen sekä silttiseen maahan, jossa on tiivis pohjamoreeni. (Palolahti 2015)



Kuva 22. TRD metodin yhdistäminen muovikalvon asentamiseen. (Cofra)

Vaikka Suomessa on siis ollut lähinnä pilaantuneen maan eristämiseen liittyviä pystyeristysseinäprojekteja, menetelmillä on täysin mahdollista rakentaa myös patoseiniä. Ongelmaksi muodostuu lohkarainen maaperä.

2.4.3 Baltian tapa rakentaa kaivantoja – staattisesti painamalla asennettavat teräspontit

Rottermannin kortteli sijaitsee Tallinnan sataman välittömässä yhteydessä. Korttelissa sijaitsee kalkkikivistä muurattuja, 2- 6 kerroksisia, maanvaraisesti perustettuja teollisuusrakennuksia, jotka ovat suojeltuja. (Rämö & Hakanen 2016)

Maaperäolosuhteet Baltiassa poikkeavat Suomen olosuhteista jääkauden vuoksi. Kohteessa peruskallio oli yli 200 metrin syvyydessä. Pinnassa on täyttömaan alla löyhiä silttikerroksia, joiden alla oli pehmeä savi. Savikerros tiivistyi alemmas mentäessä ja 15 – 20 metrin syvyydestä alaspäin aina vähintään 50 metriin oli tiivis hiekkakerros. (Rämö & Hakanen 2016) Kaivanto ulottui pohjavedenpinnan alapuolelle.

Kohteeseen rakennettiin kellarikerroksia, jotka toteutettiin osin olemassa olevien rakennusten alapuolelle. Käytännössä oli rakennettava yhdeksän metrisiä kaivantoja raskaiden vanhojen seinien viereen ja alapuolelle. Seiniä vahvistettiin teräspalkeilla ja peitettiin irtaavien kappaleiden putoamisen estävillä verkoilla kuvan 23 mukaisesti. (Rämö & Hakanen 2016)



Kuva 23. Vahvistetut säilytettävät seinät, joiden alapuolelle tuli kaivanto. (Rämö & Hakanen 2016)

Kaivannon tuenta toteutettiin kahdelta tasolta tuetuilla teräsponttiseinillä. Teräspontit asennettiin maahan staattisesti painamalla. Tuenta suoritettiin ylemmältä tasolta maanankkurein ja alemmalla tasolta sisäpuolelta halkaisijaltaan 700 mm olevilla teräsputkillla kuvan 24 mukaisesti. Kaivannon lähellä ja päällä olevat seinät vahvistettiin injektointavilla

porapaaluilla, jotka tukeutuivat hiekkakerrokseen. Porapaalut olivat itseporautuvia ”Mikropaaluja”. Kohteessa oli alkuun kokeiltu RD-paaluja, mutta kokeilu ei ollut onnistunut. Tukiseinien taipumat olivat useita kymmeniä millimetrejä ja ympäristössä havaittiin painumia. (Rämö & Hakanen 2016)



Kuva 24. Kaivannon sisäpuolinen tuenta.

Kohteessa vieraillessa staattinen painaminen vaikutti varsin hitaanlaiselta pontin upotusmenetelmältä. Sen etuna on, että se ei aiheuta tärinää ympäristöön yhtä voimakkaasti kuin vibraus tai lyöminen (Ignat 2014).

3. PORAPAAALUSEINÄN AVULLA TOTEUTETTAVA VESITIIVIS RAKENNE

3.1 Porapaaluseinän rakentaminen

Porapaaluseinä on menetelmänä parhaimmillaan, kun

- rakennuspaikalla on vaikeasti läpäistäviä täyttöjä
- kalliopinta on voimakkaasti viettävä
- ympäröivät rakenteet ovat herkkiä tärinälle
- vaaditaan hyvää sijaintitarkkuutta (Kemppainen 2006)

RD-paaluseinää muodostuu yleensä kallioon asennetuista porapaaluista, jotka on liitetty toisiinsa kuvan 28 tai 29 mukaisilla lukoilla. Porapaaluja voidaan käyttää myös maahan tukeutuvana, jos kallion päällä on karkearakeinen maakerros tai moreenikerros on paksu (Kemppainen 2006). Porapaaluseinät valmistetaan yleisimmin suurpaaluista, joiden rakenne on kuvattu alla kuvassa 25. (RD-paalutusohje) Toki porapaaluseinä on mahdollista valmistaa alkaen kokoluokan paalusta RD 170. Luku viittaa paalun halkaisijan mittaan. (RD-paaluseinä) Paaluputkista ja -elementeistä tulee löytyä toimituksen yhteydessä taakkalaput, joista ilmenee valmistaja- ja mittatiedot sekä teräslaji, jotta niitä voidaan käyttää porapaaluina.



Kuva 25. Suurporapaalun rakenne. (RD-paalutusohje)

Paalujen jatkaminen

Paalut pyritään tilaamaan täysmittaisina kohteeseen. Kuitenkin toisinaan työtekniset seikat vaikuttavat, että paaluja täytyy jatkaa. Suurporapaalut jatketaan hitsaamalla. Vaativissa kohteissa hitsiliitoksien mekaaniset ominaisuudet tulee varmistaa menetelmä- ja/tai työkokein. Hitsausvirheet, kuten huokokset, kuonasulkeumat ja liitosvirheet, heikentävät hitsiliitoksen lujuutta ja tästä syystä hitseille määritetään standardin SFS-EN ISO 5817 mukainen laatuluokka. Siinä huomioidaan rakenteelle tulevat staattiset ja dynaamiset kuormitukset, sekä paalujen asennusvaiheessa että käytössä, rakenteen käyttöolosuhteet sekä mahdollisesta vauriosta aiheutuvat seuraukset ja hitsauksen jälkeen tehtävät käsitteilyt. Yleisvaatimuksena teräspaalujen jatkohitseissä voidaan pitää hitsiluokan C vaatimuksia, jonka ammattitaitoinen hitsaaja saavuttaa tavanomaisissa konepaja- ja asennusolosuhteissa. (Ruukki) Paaluja hitsataan kuitenkin työmaalla, jota paalunvalmistaja SSAB ei luonnollisesti kuitenkaan suosittele. Jos kiinnihitsaus epäonnistuu tai on huonolaatuinen, tapahtuu työnaikaisia irtoamisia hitsauksesta tai hitsin ja perusaineen rajapinnasta. Jos hitsausta tehdään liian kovilla lämpöarvoilla, hitsaus saattaa aiheuttaa perusaineeseen, maakenkään tai paaluputkeen karmenemista ja haurastumista. (Mara 2015) Tästä seurauksena on myös työn epäonnistuminen tai/ja kuormituskyvyltään heikentynyt paalu. Kuitenkin jatkettavat paalut olisi aina mainittava tilattaessa, niin että jatkos ja liitettävä putki voidaan merkitä pareiksi. Jatkoksen teon yhteydessä on varmistettava, ettei paaluelementtien välille synny kulmamuuutosta. Työmaalla tehtävässä jatkohitsauksessa on myös kiinnitettävä huomiota lukkoprofiilin hitsaukseen. Tarvittaessa lukkoon voidaan työmaalla leikata viisteet, jotta paalu saadaan hitsattua myös lukkoprofiilin kohdalta. (RD-paaluseinä)

Paalujen korroosio

Porapaaluseinä on teräsrakenne ja siksi pysyviksi tarkoitetuissa porapaaluseinissä on huomioitava korroosio alla olevan taulukon 9 mukaisesti. Korroosiovara tarkoittaa, että seinämäpaksuutta ylimitoitetaan siten, että paksuus on käyttöiänkin jälkeen vielä riittävä kantamaan rakenteelle suunnitellut kuormat. (RD-paalutusohje) Jotta ylimitoitus saadaan oikeanlaiseksi, pohjatutkimuksissa tulee ottaa huomioon mahdollinen tuleva porapaaluseinä ja kartoittaa ympäristöolosuhteiden aggressiivisuus. Tavanomaisesta poikkeaviksi ja eräissä tapauksissa aggressiivisiksi olosuhteiksi katsotaan:

- Runsaasti orgaanista ainetta sisältävät maapohjat (maaperän humuspitoisuus on yli 6%).
- Runsaasti rikkiä sisältävät maakerrokset (myös luonnonmaakerrokset, esimerkiksi sulfidimaakerrokset).
- Löyhät täytöt olosuhteissa, joissa täyttöön pääsee rikastumaan suoloja. (Tyypin esimerkki on löyhät täytöt meren äärellä.)
- Kaikki pilaantuneet maapohjat

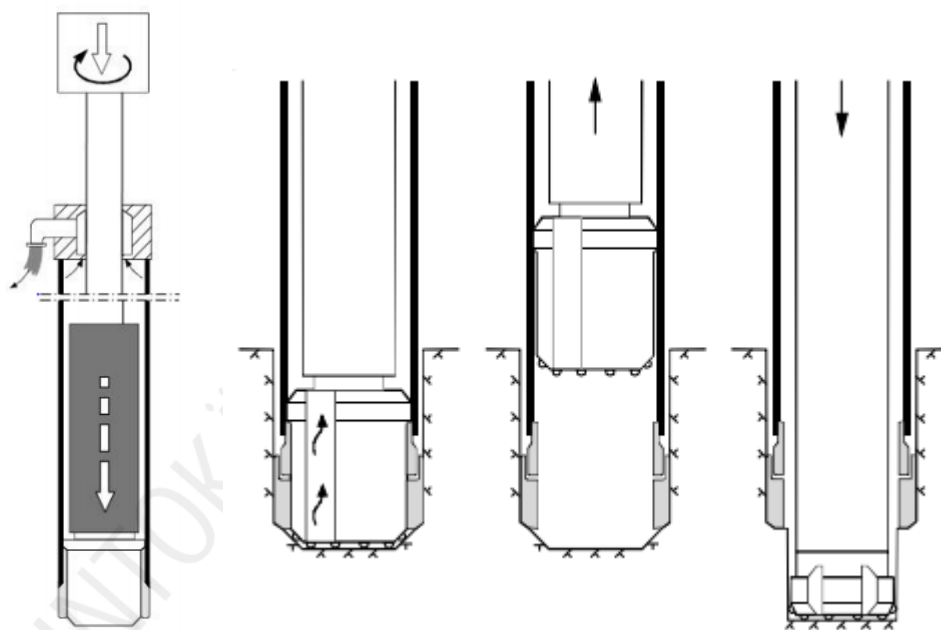
- Maa-alueet, joissa esiintyy tasavirtalähteiden aiheuttama potentiaalienttä (RIL 254-1-2011) (muuntajat, sähköjunien ja raitiovaunujen raiteet, katodisesti suojatut putkistot, sähköradat ja kaapelit, sähkökoneen huono maadoitus) (Talja 2006)

Taulukko 8. Korroosiovarat [mm] eri olosuhteissa. Tiivistetyissä täytöissä yllä olevat arvot voidaan jakaa kahdella. (RD-paalutusohje)

Tavoiteikäyttöikä	5 vuotta	25 vuotta	50 vuotta	75 vuotta	100 vuotta
Tavanomaiset olosuhteet					
Häiriintymättömät luonnonmaat (hieka, siltti, savi, liuskekivi)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Tiivistämättömät, ei-aggressiiviset kivennäismaatäytöt	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tavanomaisista poikkeavat tai aggressiiviset olosuhteet					
<u>Pilaantuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet</u>	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnonmaat (suo, räme ja turve)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
<u>Tiivistämättömät ja aggressiiviset täytemaat (tuhka, kuona)</u>	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Poraus

Porapaalutuskalusto olisi järkevää olla ominaisuuksiltaan sellainen, että sillä voidaan liikkuu juuri kyseisen työmaan olosuhteissa luotettavasti ja turvallisesti koon ja painon puolesta ja että se täyttää suunnitelmissa olevien paaluelementtien pituudelle asetetut vaatimukset. Jatkohitsaukset tulee minimoida (RD-paaluseinä). Porauslaitteet ovat joko päältätyövään vasaraan tai uppovasaraan perustuvia. Pääältätyöväällä porauslaitteella voidaan kuitenkin asentaa vain halkaisijaltaan enintään 200 mm porausputkea, joten suurpaalut asennetaan uppovasaraan perustuvalla laitteella. Uppovasaraan perustuvan porauslaitteen poravasara on yleensä joko pneumaattinen tai vesikäyttöinen. Porauslaitteeseen kuuluu myös hydraulinen pyöritysyksikkö ja poratangot. Porausputken sisällä olevat poratangot kiinnittyvät ohjausholkin välityksellä uppovasaraan, joka edelleen kiinnittyy porakruunun kruunun päällä olevan ohjausosan niskakappaleen välityksellä. Isku kohdistuu ohjainosasta maakenkään, jolloin porausputki vedetään maahan. Pyöritysyksikkö, joka puolestaan sijaitsee paalun pään yläpuolella, pyörittää poratankoja. Tämä on kuvattu kuvassa 26. Paalutusohjeen mukaan paalun pituudella ei ole vaikutusta poraustehoon tai asennusnopeuteen. (RIL 254-2-2011) Koheesiomaissa on menestyksekkäästi toteutettu kohteita, joissa porapaalut vibrataan koheesiomaiden läpi, augeroidaan tämän jälkeen auki ja lopuksi porataan vaikeammin läpäistävien maakerrosten läpi kallioon (Pasanen 2016). Tämä on esitelty kappaleessa 2.4.1.



Kuva 26. Vasemmalla kuvattu upposaraan perustuva laite ja oikealla keskisen porausmenetelmän periaatekuva.

Porapaaluseinä asennetaan keskisellä porausmenetelmällä, joka on kuvattu yllä kuvassa 26. Siinä porausputken alapäähän kiinnitetään maakengän välityksellä avarrinkruunu, joka pääsee pyörimään, ilman että porausputki pyörii. Paalutusohje ohjeistaa, että porauksen ajaksi avarrinkruunu lukitaan pilottikruunuun. Porauksen päätyttyä pilottikruunu irtotetaan avarrinkruunusta ja nostetaan ylös. Porakruunujärjestelmissä on myös nk. läpiporattavia avarrinkruunuja, jossa kallioporausta jatketaan samalla pilottikruunulla. (RIL 254-2-2011) Vaihtoehtoisesti porapaalu voidaan asentaa myös poraustekniikalla, jossa pilottikruunussa on vähintään kolme kappaletta aukeavia segmenttejä ts. porasiipiä, joiden avulla voidaan maahan ja kallioon tehdä paaluseinän edellyttämää ylikoon porareikää. (SSAB RD-paaluseinä) Avartimia on kuvattu alla olevassa kuvassa 27. Ruukin RD-paaluseinän suunnittelu- ja asennusohjeessa mainitaan, että avarrinkruunuja on siis kahta perustyyppiä: irrallinen, maakenkään lukitsematon tyyppi ja kiinteä, maakenkään lukittava tyyppi. Kumpaakin tyyppiä voidaan käyttää RD-paaluseinässä. (RD-paaluseinä)



Kuva 27. Keskinen porausmenetelmä joko vasemmalla olevalla normaalikokoa suuremmalla avarrinrenkaalla tai oikealla olevalla avautuvilla avarrinsiivekkeillä. (Lehtonen 2015)

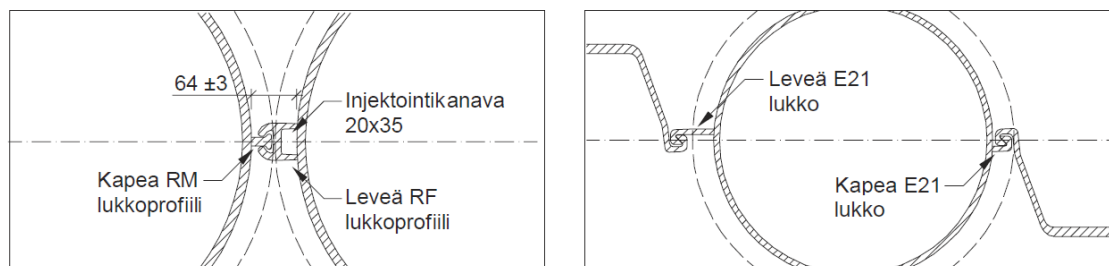
Asennustyö voidaan tehdä joko seinälinjan suuntaisesti porapaalutuskalustoa perä edellä ajaen tai seinälinjan sivusta. Seinä voidaan asentaa kummalta puolelta tai kumpaan suuntaan tahansa. Asennus voidaan aloittaa myös seinälinjan keskeltä tai kulmakohdasta. Asennus tehdään kuitenkin aina niin, että kapea eli uroslukkoprofiili on paalussa seinän etenemissuunnan puolella. Ensimmäisessä RD-paaluseinän paalussa ei saa olla leveää lukkoprofiilia. RD-paalun kohdatessa kiven, lohkareen tai kallion, pidetään syöttövoima pienenä ja nostetaan pyörimisnopeutta. Menetelmä estää paalua muuttamasta porattaessa suuntaansa. Jos paalu on asennettava laskevan kalliopinnan vuoksi syvemmälle kuin edellinen, leveää lukkoprofiilia ei voi ulottaa paalun alapäähän. Muutoin lukkoprofiili törmää edellisen paalun avarrinkruunuun ja asennus edellistä paalua alemmas ei ole mahdollista. Niissä paaluseinissä, joissa on vedenpitävyysvaatimuksia, on lukkoprofiilit ulotettava niin alas kuin vain mahdollista. Ensimmäisen paalun asennus on kriittisin linjauksen kannalta. On varmistettava, että lukkoprofiilit pysyvät linjassa, eikä paaluputki pääse missään vaiheessa pyörimään. Seuraavat paalut tukeutuvat edelliseen, joten ne pysyvät paremmin linjassa. Jos seinän linjaus on erityisen tarkka, paalut tulee asentaa maanpinnan tasoon rakennetun ohjainkehikon läpi. Porattaessa paaluihin saattaa muodostua painetta. Siksi vaaratilanteiden välttämiseksi paalujen päät on suojattava heti ja huolella. (RD-paaluseinä)

Käytettäessä RD-paaluseinää työnaikaisena tuki- tai/ja patoseinä voidaan paalut käyttää monta kertaa uudestaan. Tällöin RD-paalut täytetään maa-aineksella ennen paalujen ylösnostoa, jotta paalujen nostosta ei aiheudu vaaratilanteita tai merkittäviä painumia. Paalujen ylösnosto voidaan tehdä esimerkiksi ponttivasaralla. Integroidun avarrinkruunun vaikutus tulee huomioida ylösnostettaessa. (RD-paalutusohje)

Paalujen lukitus toisiinsa

Paaluputket kiinnitetään toisiinsa lukkoprofiiliparilla. Uotisen ja Jokiniemen tutkimuksessa ”RD pile wall – A new way to build micropile retaining wall structures” (Uotinen 2013) porapaaluseinän historia jaetaan kolmeen kehitysvaiheeseen käytössä olleen lukkotyyppin mukaan. Ensimmäisen sukupolven seinissä oli käytössä combiseinistä tuttu E21-lukko. Avarrinkruunu oli 47 mm suurempi kuin paalu. Toisen sukupolven porapaaluseinässä oli käytössä WOM/WOF-lukko. Ylikoko avarrinkruunussa kapeni 30mm:iin. Ensimmäistä kertaa lukkoon laitettiin tiivistettä. Kolmannen sukupolven porapaaluseinässä ja lukossa RM/RF injektointikanavalla kiinnitettiin vielä enemmän huomiota vesitiiveyden saavuttamiseen. Myös avarrinkruunun ylikokoa voitiin pienentää Uotisen tutkimuksen mukaan 27 mm:iin. (Uotinen 2013)

Nykyään käytössä olevissa RM/RF-lukoissa kapeaa lukkoa kutsutaan uroslukoksi ja leveää naaraslukoksi. Naaraslukko voidaan täyttää tiivistysmassalla, jotta lukon vesitiiveyttä saadaan parannettua. Vesitiiveys voidaan varmistaa hitsaamalla lukkoliitos umpeen. Vuotavissa lukkoliitoksissa voidaan hitsata teräslevy lukkoliitoksen eteen paaluputkien väliin ja tarvittaessa vielä injektoida ko. väli. (RIL 263-2014)



Kuva 28. Vasemmalla RM/RF –lukko ja oikealla E21-lukko. (RD-paaluseinä)

Kuvassa 28 oleva RM/RF-lukko syntyi korvaamaan kuvan 29 WOM/WOF-lukon. Tähän uuteen lukkotyyppiin on integroitu injektointikanava, joka mahdollistaa paalun alapään injektoinnin ilman erillisen injektointiputken asentamista. Injektoinnilla parannetaan paalun alapään vesitiiveyttä ja jäykistetään paalun ja kallion välistä liitosta. (Ruukin teräspaalupäivät 2012) RM/RF-lukko kykenee myös välittämään puristuskuormia toisin kuin E21-lukko.



Kuva 29. WOM/WOF-lukko. (Ruukin teräspaalupäivät 2011)

RD-paaluseinä porataan aina kun mahdollista kallioon. Porattaessa pohjoismaiseen hyvään kallioon SSAB on ohjeistanut, että poraussyvyys ei tarvitsisi olla yli 1500 mm, vaikka suositus poraussyvyydestä on 3 x paalun halkaisija. Paalun alapään tuenta kallioon voidaan tehdä myös poraamalla erilliset ankkurit, ponttiseinälle tyypilliset kalliotapit tai pienemmät porapaalut paaluputkien läpi kallioon. Jos RD-paaluseinää ei uloteta kallioon, tukeutuu se passiivisen maanpaineen varaan. Kun paalut asennetaan kallioon, ei juuripalkkia tarvita seinän alapään tukemistarkoitukseen. Asentamalla RD-paaluseinä riittävästi kallion sisään ja tarvittaessa vielä injektoimalla liitoskohta, tukiseinä toimii osittain momenttijäykkänä mastorakenteena, jolloin tukitasojen tarve vähenee. RD-paaluseinien tuenta voidaan tehdä sisäpuolisena tai ulkopuolisena tuentana. Sisäpuolisessa tuennassa esimerkiksi pohjalaatta, rakennuksen välipohja tai kaukalon kansirakenne voi toimia vaakatukena. Ulkopuolinen tuenta tehdään maa- tai kallioankkureilla tai vetotankojen avulla ankkurilaattoihin muiden seinärakenteiden tapaan. Vetoankkurit voidaan asentaa lukkoosan läpi, mikäli reiän halkaisija on RM/RF -lukolla korkeintaan 60 mm ja E21 -lukolla korkeintaan 90 mm. Jos ankkuritangon edellyttämä reikä on suurempi, tulee asennus tehdä paalun läpi. Mikäli tukitaso on mahdollista tehdä RD-paaluseinän yläpäähän, voidaan tehdä erillinen konsolirakenne, jolla vältetään seinän rei'ittäminen. (Ruukki 2)

Vaikutus ympäristöön

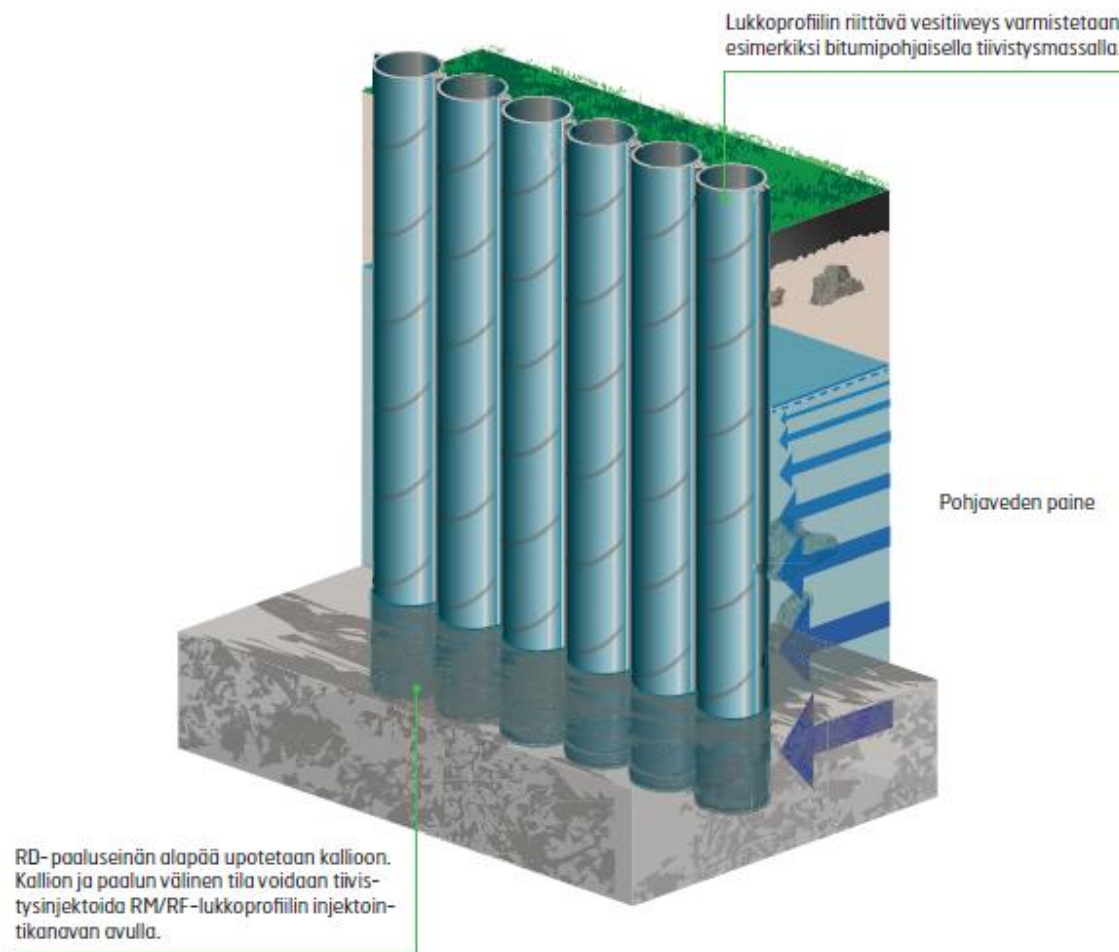
Maan siirtymiin RD-paaluseinän läheisyydessä vaikuttaa eniten maaperän ominaisuudet. Vaikutusta on myös porausjärjestelmällä, poraustyön suorittamisella ja lukkotyypillä. Painumia aiheuttaa käytettävä ylikoon avarrinkruunu, jonka suuruus taasen määräytyy lukkotyyppin ja paalukoon mukaan. Tiiviissä kitkamaissa maan siirtymät RD-paaluseinän läheisyydessä ovat vähäisiä. Löyhissä kitka- ja täyttömaissa sekä pehmeissä koheesiomaissa seinän läheisyydessä voi tapahtua painumia. Tyhjätilan täyttymisen lisäksi painuminen voi aiheutua myös paineilman karkaamisesta paaluputken ulkopuolelle ja tämän aiheuttamasta maakerrosten löyhtymisestä ja häiriintymisestä. Ilman käyttö on kahtiajakoista. Käytettäessä ilmaa mahdollisimman vähän, häiriintyy läheinen maa vähemmän, toisaalta taas tyhjätilan täyttyminen porasoihasta ei ole yhtä luotettavaa. Painumien välttämiseksi voidaan käyttää erilaisia työtekniikoita. Pehmeissä koheesiomaissa maanläpäisy voidaan tehdä painamalla tai täryttämällä muuttuvataajuksisella täryttimellä avoin paaluputki pehmeiden maakerrosten läpi. Tämän jälkeen aloitetaan vasta poraaminen. (RD-paaluseinä)

Porapaaluseinää pidetään painumattomana rakenteena. Kuitenkin Erosen tutkimuksessa, johon on viitattu myös Savolan diplomityössä, kiinnitetään huomiota, että tyhjät paaluputket, joiden alapäässä on avarrinkruunu, lähtevät painumaan merkittävästi kuormitettaessa. Syynä ovat avarrinkruunun kovametallinastat, jotka rikkovat kalliota. Tällainen kuormitus voisi olla esimerkiksi seinän ankkurointi tai yläpuoliset rakenteet. Tätä painumista pystytään vähentämään 50%:lla betonoimalla putkipaalut heti kuin mahdollista. (Eronen 1997, Savola 2004)

3.2 Porapaaluseinän vesitiiveys

RD-paaluseinien veden läpäisevyyteen vaikuttavat maaperän ominaisuudet sekä pohjavesiolosuhteet. Kuvassa 30 on esitetty vesitiivis porapaaluseinärakenne. (Ruukki2) Porapaaluseinän vesitiiveydelle kriittisiä kohtia ovat:

- lukkojen vesitiiveys
- paalun alapään liitos kallioon
- ankkureiden läpiviennit

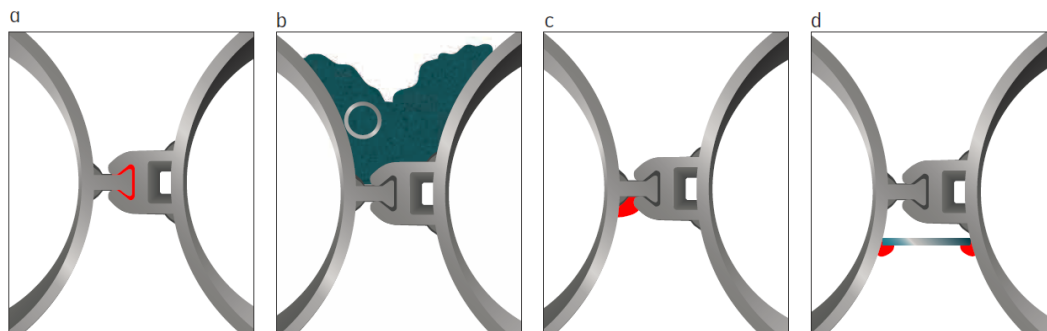


Kuva 30. Vesitiivis RD-paaluseinä rakenne. (Ruukki2)

3.2.1 Lukkoprofiilin vesitiiveys

RIL:n Kaivanto-ohje keskittyy pääasiassa porapaaluseinän lukkoliitoksiin vesitiiveyden yhteydessä. Sen mukaan työnaikaisille tukiseinille ei tarvita erityistoimia, jos kyseessä on hienoainespitoinen maa ja vedenpaine-ero on ”kohtuullinen”. Termiä ”kohtuullinen” ei teoksessa avata. (RIL 263-2014) Toisissa lähteissä kohtuullisuuden raja menee 80 kPa:ssa (Tukiseinäratkaisu kaikkiin olosuhteisiin). Tällöin vuotoveden mukana kulkeutuva hienoaines tukkii lukkoliitokset (RIL 263-2014). Ruukin asennusoppas lupaa ”merkityktöttömän pientä” lukon läpäisevää vesimäärää, kun vedenpaine-erot ovat korkeintaan luokkaa 50 – 80 kPa ja maaperän vedenläpäisevyys on pieni, toisin sanoen hienorakenteisilla mailla. Kun nämä olosuhteet eivät toteudu, todennäköisyys vesivuotoihin lukon läpi kasvaa. Sekä Ruukin asennusoppaassa että Kaivanto-ohjeessa todetaan, että lukkoprofiileihin ei kohdistu asennuksen aikana merkittäviä rasituksia, eikä näin ollen syntyisi lukkoprofiilien muodonmuutoksista johtuvia vuotokohtia. Oppaassa todetaan, että jos RD-paaluseinään kohdistuu selkeä vesitiiveysvaatimus, on syytä käyttää lukkoprofiileissa aina jotain tiivistysainetta. Oppaassa otetaan kantaa myös tilanteisiin, joissa ollaan

pohjavedenpinnan alapuolella, kuten vaativissa kaivannoissa yleensä ollaan. Tällöin rajataan pois kuvan 31 c lukkoprofiilin kiinnihitsaus sekä polyuretaanipohjaiset tiivistysaineet. Oltaessa pohjavedenpinnan alapuolella opas kehottaa hitsaamaan kuvan 31 d mukaisesti lukon eteen lattatangon ja vielä tarvittaessa injektoimaan sen ja lukkoprofiilin välinen alue. Myös Kaivanto-ohje esittelee kuvan 31 mukaiset ratkaisut. (RD-paaluseinä, RIL 263-2014)



Kuva 31. RD-paaluseinän lukkoprofiilin vesitiiveyden parantamiskeinoja: a) lukkoprofiiliin asennettava tiivistysaine, b) taustan injektointi, c) lukkoprofiilin kiinnihitsaaminen ja d) lattatangon hitsaus lukkoprofiilin eteen. (RD-paaluseinä)

SSAB:n asennusopas toteaa tiivistysaineita olevan erilaisia ja eri valmistajilta. SSAB on testannut eräitä tiivistysaineita laboratorio-olosuhteissa. Kuitenkin painotetaan, että materiaalin soveltuvuus kunkin asennuskohteen olosuhteisiin tulee arvioida aina erikseen. (RD- paaluseinä)

Taulukko 9. Taulukossa on esitetty laboratorio-olosuhteissa saatuja vesitiiveyden arvoja vedenpainetasojen arvoilla. (PU=polyuretaani) (RD- paaluseinä)

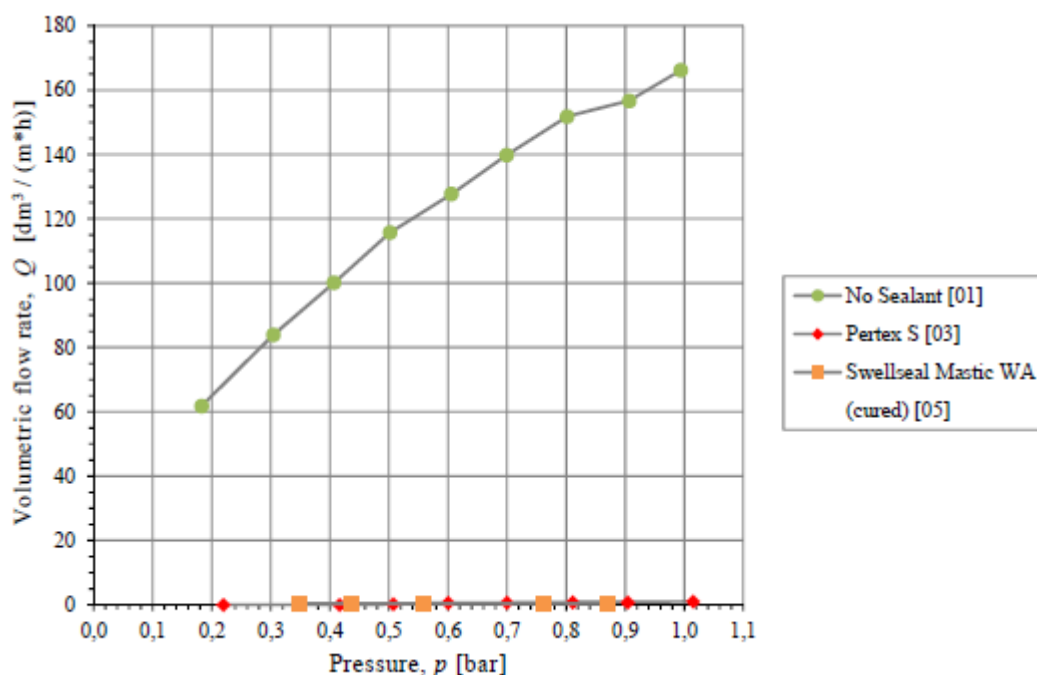
Tiivistysmateriaali	Testissä saavutettu vedenpainetaso [m]		
	Heti asennuksen jälkeen	1 vrk asennuksesta	1 kk asennuksesta
Pelkkä RM/RF-lukkoprofiilipari	0	0	0
Bitumipohjainen materiaali	15	15	15
PU-pohjainen materiaali	0	15	15
Terva-rasva seos	0	0	0

Taulukko 10. Tyhjän RM/RF-lukkoprofiilin läpi virtaavan veden määrä eri painetasoilla laboratorio-olosuhteissa. (RD- paaluseinä)

	Lukkoprofiiliparin läpi virtaavan veden määrä [Vh/m]								
	Veden painetaso [m]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tyhjä RM/RF-lukkoprofiilipari	50	100	150	200	250	300	350	400	450

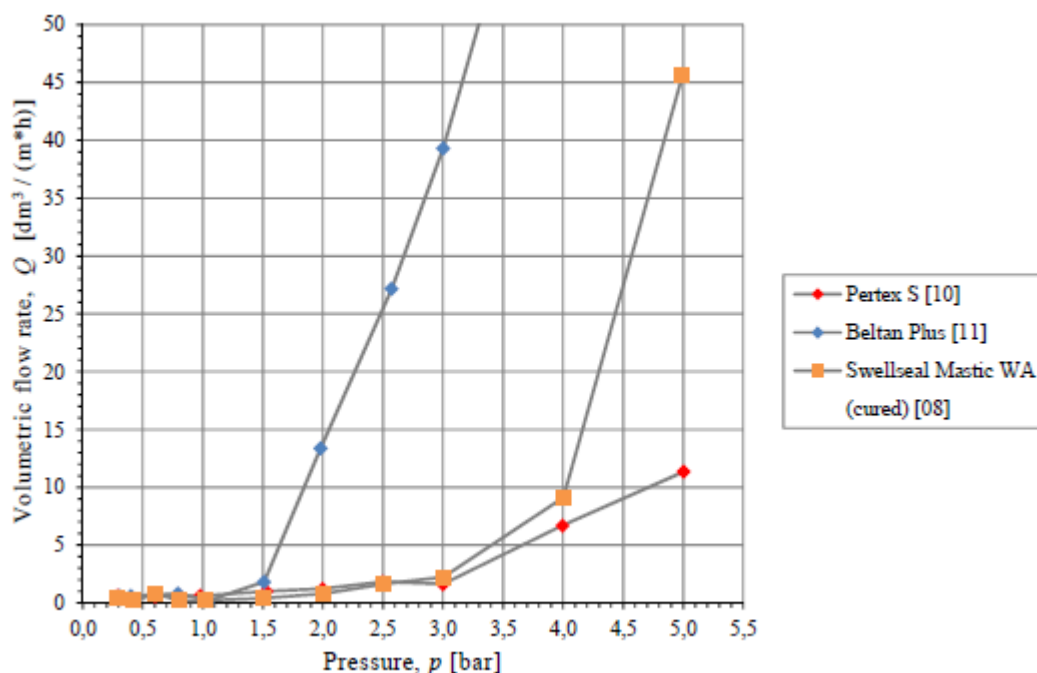
SSAB on teettänyt Tampereen teknillisellä yliopistolla RM/RF -lukon vesitiiveyteen liittyviä tutkimuksia. Vuonna 2014 teetetyssä tutkimuksessa tutkittiin viittä eri tiivistettä: bitumipohjaisia ArcelorMittalin Beltan Plus tiivistettä sekä Eshan Pertex S tiivistettä, veden vaikutuksesta turpoavaa Swellseal Mastic WA:ta, öljy–tervaseosta sekä tyhjää lukkoa. Saavutetut vedenpainetasot ovat kuvattuna yllä taulukoissa 9 ja 10. (TTY 2014)

Swellseal (uncured) ja öljy–tervaseos vuosivat jo alhaisissa paineissa voimakkaasti. Siksi niiden tuloksia ei ole esitetty alla olevissa kuvissa. Muiden osilta tulokset on esitetty alla olevassa kuvassa 32. (TTY 2014)



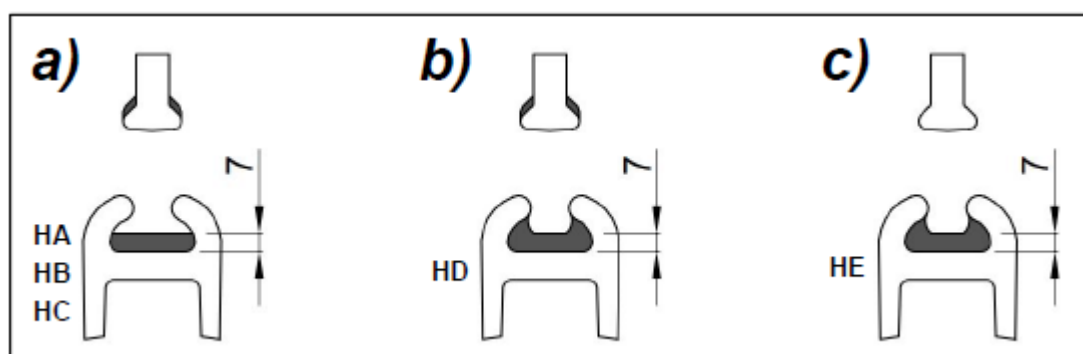
Kuva 32. Tiivistysaineiden tuloksia vesitiiveystestissä.

Testi tehtiin myös 23 °C kalsiumhydroksissa, jonka pH on 12,3. Bitumipohjaisille tuotteille tuli selvä eroavuus toisistaan. Tulokset ovat kuvassa 33. Vuodot alkoivat 1,5 baarin paineen jälkeen. Testi tehtiin myös 55 °C:ta mutta tässä vuotoja ei juurikaan ollut. Vuotoja ei myöskään ollut silminnähävästi testattaessa tuotetta 10% natrius kloridissa. Natrium kloridia esiintyy merivedessä sekä paikoitellen myös kallioperässä. (TTY 2014)



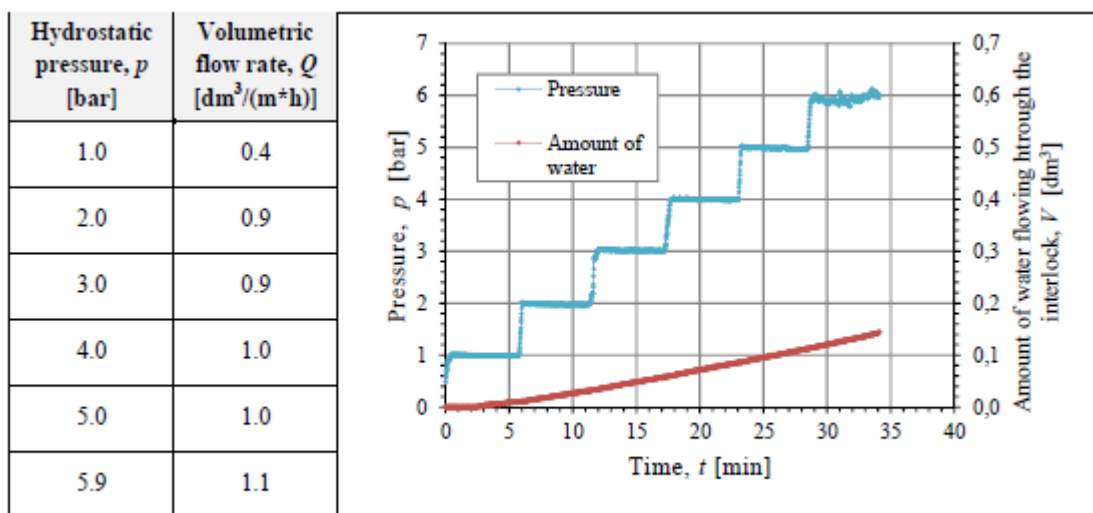
Kuva 33. Vesitiiveys 23 °C kalsiumhydroksissa.

Maaliskuussa 2015 tehdyssä tutkimuksessa testattiin erilaisia asennustapoja bitumipohjaisen tiivisteeseen. Tiivisteenä käytettiin Eshan Pertex S:ää. Kokeessa testattiin sekä tehtaalla asennettua että työmaalla asennettua tiivistettä. Tiivistettä asennettiin kuvan 34 mukaisesti kolmella eri tavalla. Bitumi kuumennettiin nestemäiseksi ja asennettiin naaraslukkoon. Testeissä HD ja HE bitumi nostettiin myös naaraslukon reunoille. HA – HD testeissä bitumia levitettiin myös uroslukon pinnalle. (TTY 2015)



Kuva 34. Kolme eri asennustapaa testattiin. (TTY 2015)

Bitumin jäähtyttyä lukot asennettiin kiinni. Testeissä HA–HC 0,2–0,4 kN voimalla ja testeissä HD ja HE 1,5–3 kN voimalla. HE lukossa havaittiin kuvan 35 mukaisesti pientä vuotoa. Muissa lukkoissa ei esiintynyt silminnähden havaittavaa vuotoa. (TTY 2015)



Kuva 35. HE lukossa havaittiin vuotoa. Se oli ainut lukko, jossa uroslukkoon ei oltu levitetty tiivistettä. (TTY 2015)

Syksyllä 2014 testattiin myös tiivisteen pitkäaikaiskestävyyttä. Kokeen johtopäätöksenä todettiin, että polyuretaanipohjaista Swellseal Mastic WA tiivistettä ei suositella porapaa-lujen lukkojen tiivisteeksi. Myöskään Beltan Plus ei pärjännyt testissä kovinkaan hyvin. Pertex S tiiviste pärjäsi näistä kolmesta parhaiten, mutta senkin kohdalla kehoitetaan erityisen huolelliseen levittämiseen lukkoon. (TTY 2014 2)

Syksyllä 2015 testattiin tiivisteen paksuuksia. Testitiivisteenä käytettiin Eshan Pertex S:ää. Tiivistettä laitettiin naaraslukkoon 4, 7 ja 10 mm kerros. Neljän millimetrin kerroksissa painetta ei pystynyt lisäämään, kun lukko jo vuosi runsaasti. Myös 7 mm kerroksen kohdalla oli runsaasti vuotoja. Myös 10 mm kerrokset vuotivat. (TTY 2015 2)

Vastaavasti terästuotetoimittaja ArcelorMittal on testannut lukkojen vesitiiveyttä. Ensinnäkin tiivistysaineilla ja ilman kuvan 36 mukaisesti. Sekä erilaisten tiivistysaineiden soveltuvuutta taulukon 12 mukaisesti. Teräsponttiseinässä oleva lukkosysteemi on samanlainen kuin ennen porapaaluseinässä käytetty E21-lukko. Testi poikkeaa SSAB:n testistä, sillä että se on tehty työmaaolosuhteissa. SSAB: testiä on kentällä kritisoitu juuri laboratorio-olosuhteista. Testissä ponttien upottamiseen käytettiin vibraa. (ArcelorMittal 2)



Kuva 36. Lukkojen vesitiiveys. Käyrä 1 on tyhjä lukko, käyrä 2 maalla täyttynyt lukko ja käyrä 3 tiivistysaineella täytetty lukko. Vaaka-akseli kuvaa vedenpainetta ja pystyakseli vuotoa. (ArcelorMittal 2)

Porapaaluseinissä tuotteen tultua markkinoille ei käytetty minkäänlaisia tiivistysaineita. Työmailla elää yhä sitkeästi ajatus, että lukko kyllä tiivistyy porasoijalla. Tämä tietenkin edellyttää, että maaperässä on hienorakeista ainesta. Lisäksi Savolan diplomityön koejärjestelyissä on havaittu, että käytettäessä poraustyössä huuhteluaineena vettä, se lajittelee maaperää lähellä paaluputkea huuhtoen hienoaineksen pois. Tällöin lukkojen tukkeutuminen hienoaineksella ei muuten suotuisista olosuhteista huolimatta pääse tapahtumaan. (Savola 2004) Nykyään porapaaluseinien lukoissa käytetään tiivisteitä. Vakiintunut käytäntö vaikuttaisi olevan bitumipohjaiset tiivisteet.

Taulukko 11. Lukkojen eri tiivistysaineiden toimivuus ja hintavertailu (ArcelorMittal 2)

Vesitiiveys järjestelmä	$\rho [10^{-10} \text{ m/s}]$			Menetelmän käyttö	Hintataso**	Seinäpuolien maksimi vedenpaine-ero
	<u>Vedenpaine</u>	<u>100 kPa</u>	<u>200 kPa</u>	<u>300 kPa</u>		
Tyhjä lukko	>1000	*	-	-	0	100
Lukontiiviste Beltan Plus	< 600	-	-	Helppo	1,0	100
Lukontiiviste Acroseal	< 600	-	-	Helppo	1,2	100
Lukontiiviste Roxan Plus system	0,5	0,5	-	Huolella	1,8	200
Lukontiiviste Akila system	0,3	0,3	0,5	Huolella	2,1	300
Hitsattu lukko	0	0	0	Kaivun jälkeen työmaalla	5,0	-

* Arvo saatavilla ainoastaan 150 kPa:ssa: > 4500

$$** \text{ Hintataso} = \frac{\text{Ratkaisun hinta}}{\text{Beltan plus tiivisteen hinta}}$$

Taulukossa 11 esiintyvistä testatuista tuotteista heikoimmin menestynyttä Beltania on käytetty porapaaluseinissä. Se on testin ainoa bitumipohjainen tuote. Se koostuu bitumista ja polymeerista. Bitumipohjaisille tuotteille yleistettäviä tuloksia testissä todettiin, että tuote on jo lukossa, se tulee kuljettaa täysin vaakatasossa ja lukot aukeamissuunta täysin ylöspäin. Terästuotetta, jossa on bitumipohjainen tiiviste, ei saa säilyttää auringossa ke-sääikaan. Testissä Beltaniin rinnastettu Acroseal on vahapohjainen tuote ja koostuu mi-neraaliöljystä ja parafiinivahasta. Sille pätee samat rajoitukset kuin Beltanille. Kumpiakin suositellaan helpokoihin olosuhteisiin. Ne eivät siedä öljyperäisiä aineita tai sovellu olosuhteisiin, missä on seisovaa vettä. ArcelorMittal päätyy suosittelemaan Beltania lähinnä lukon suojaamiseksi epäpuhtauksilta sekä voiteluaineeksi paremminkin kuin tiivisteeksi. Roxan Plus koostuu veden kanssa kosketuksiin joutuessa turpoavasta polyuretaanista sekä silaanilla modifioidusta polymeeristä. Kaikkien näiden tuotteiden rajoitteena on ollut pakkanen. ArcelorMittal ei suosittele minkään näiden kolmen aikaisemmin mainitun tiivisteen asennusta teräksessä alle -10°C:ssa. Lisäksi Roxanin rajoituksena on, että asennus tulee tapahtua suhteellisen nopeasti, ehdoton maksimi kaksi tuntia, muuten tiiviste tulee repeytymään irti joutuessaan veden kanssa kosketuksiin ja jatkettaessa asentamista turpoamisen jälkeen. Lisäksi rajoitus veden kanssa tekemisiin joutuessa hankaloittaa tuotteiden varastointia ja kuljetuksia. Vibratessa on myös riksi, että ylitetään 130° C raja kitkan tuottaman lämmön vuoksi, jolloin tiiviste vaurioituu. Roxan tarvitsee erikseen asennetun voiteluaineen, jotta terästuote saadaan ylipäätään paikalleen ja ilman liian suurta kitkan tuottamaa lämpöä. Akila on ArcelorMittalin uusin innovaatio ja se perustuu

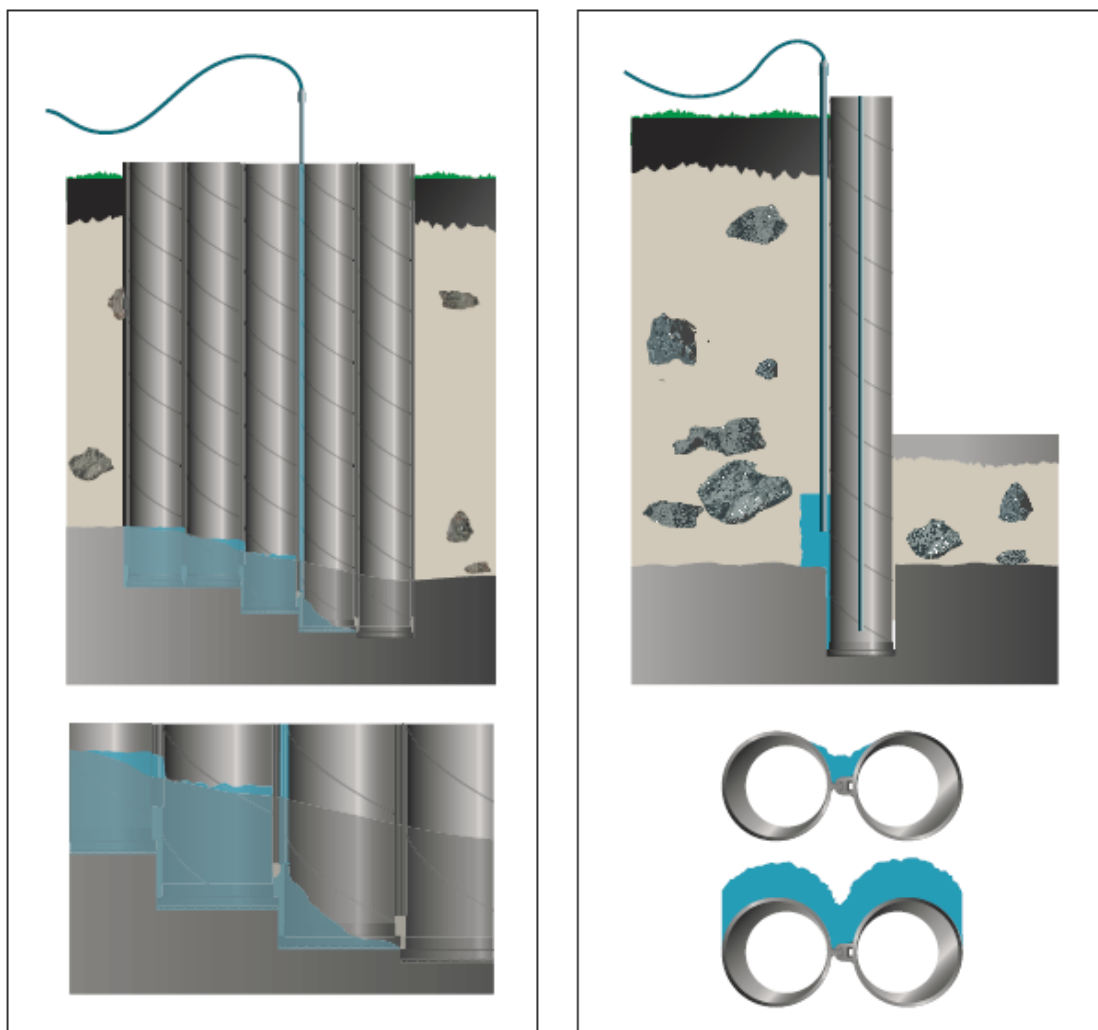
erilaisiin MS polymeereihin eli silaanilla modifioituihin polymeereihin. Sen ympäristöystävällisyyttä korostetaan, mutta osa aikaisempien aineiden heikkouksista on entisestään korostunut siinä. Asennuksen lämpötilan alaraja nousee nolllaan. Voiteluaine on ehdoton. Vibrauksessa on käytettävä erityistä varovaisuutta. Kuitenkin Akila ei sisällä veden kanssa tekemisiin joutuessa paisuvia aineita, joten kaikki nämä hankalat rajoitukset vältetään. (ArcelorMittal 2) SSAB on käyttänyt lukkojen tiivistyksessä Beltania sekä toista bitumiin ja polymeereihin perustuvaa Kerabit Kumisaumoa. Eräs urakoitsija kertoi haastattelussa käyttäneensä lukoissa Roxanin kaltaista veden kanssa turpoavaa polyuretaania menestyksekkäästi.

3.2.2 Paalun alapään vesitiiveys kalliossa

RIL:n Kaivanto-ohjeessa todetaan alapään kallioliitoksen olevan ”varsin hyvin vettäpitävä, mutta ei varmuudella vesitiivis”, kunhan alapää upotetaan ”riittävästi” kallioon. Tämä riittävä upotus on Ruukin oppaan mukaan 0,5 – 1,5m. (RD-paalutusohje) ”Vesitiiveyden varmistamiseksi” esitetään paaluvaipan ulkopuolisen kallioreikätilan injektointia lukkoprofiilissa olevan injektointikanavan kautta. Lisäksi porapaaluseinän alapuolinen kallio voidaan verhoinjektoida paaluputkien sisälle asennettavan injektointiputken kautta. (RIL 263-2014)

Ruukin ohjeessa todetaan alapään vesitiiveyden olevan kiinni pohjavesiolosuhteista sekä kallion että välittömästi kallion päällä olevan maakerroksen vedenläpäisevyydestä. Kuitenkin opaskin muotoilee, että kunhan paalut saadaan varmuudella kallion sisään, se estäisi veden suotautumisen seinän sisäpuolelle. Opas toteaa, että seinän alapään vesitiiveys voidaan varmistaa injektoidulla putken ja kallion välinen tila. Tämä voidaan tehdä kuvan 37 vasemman puoleisen kuvan mukaisesti käyttämällä RF-lukkoprofiilin injektointikanavaa. Injektointia voidaan suorittaa myös paalun sisäpuolelta, käyttäen paalun sulkevaa mansettia. Oppaassa kuitenkin jatketaan, että tehtäessä kallioon ulottuvaa kaivantoa RD-paaluseinän avulla, juuripalkin teko on mahdollista. Myös paaluputkien läpi tehtävät tukiseinän alapuolisen kallion tiivistysinjektointi kallion kautta tapahtuvan pohjavesivirtauksen estämiseksi mainitaan. Avoimia paaluja voidaan käyttää myös pohjaveden alenamiseen pumppauskaivorakenteina. (RD-paalutusohje)

Opas mainitsee lisäksi erilaiset jälki-injektoinnit seinän kaivamattomalle puolelle mahdollisina. Nämä mainitaan vesitiiveyden parantamistoimina mutta myös taustan maaperän tiivistämis- ja lujittamistoimina. SSAB:n ehdottamat keinot ovat kuvan 37 oikean puolen mukaisesti porata tai painaa injektointiputki seinän taakse tai paalujen saumakohtiin asennuksen jälkeen. Nämä injektointiputket on myös mahdollista kiinnittää paaluihin jo ennen asennusta. (RD-paalutusohje)



Kuva 37. Jälki-injektointia lukon tai erillisen injektointiputken kautta. (RD-paalutus-ohje)

Miettisen diplomityössä ”The Rotational Stiffness and Watertightness of RD Pile Walls in the Bedrock and Pile Interface” mainitaan mahdollisuudesta, että porapaaluseinää ei porata kallioon saakka vaan tuenta tapahtuu juuritapeilla ja juuripalkilla. Varsinainen vesitiiveys saavutettaisiin jälkeinpäin valetulla juuripalkilla. (Miettinen 2014) Tätä yritettiin Kalasatamassa huonolla menestyksellä vaikka seinä oli kallioon upotettu. Tarkemmin tapaus on esitetty kappaleessa 5.2.2.

3.2.3 Ankkurien läpiviennit

SSAB:n ”Tukiseinäratkaisu kaikkiin olosuhteisiin” -ohjeessa on ainoat maininnat ankkuroinnista. Sanamuodoista saa käsityksen, että ankkurointia kannattaa kaikin keinoin välttää. Annetaan useita rakennevaihtoehtoja, joilla ”vä”tetään paaluihin tehtävät ankkuri-reiät”. Ankkurireikien vesitiiviiksi saamiseksi ei oteta minkäänlaista kantaa. (Ruukki 2)

Kalasadama case-tutkimuksessa kappaleessa 5.3.2 ilmenee, että ankkurointi on vesitiiveyden kannalta erittäin hankalaa. Myös haastattelututkimuksessa kappaleissa 4.2.2 sekä 4.3.2 ongelma nousevat esiin.

4. PORAPAAALUSEINIEN VESITIIVEYTTÄ KOSKEVA HAASTATTELUTUTKIMUS

SSAB:n porapaaluseiniä on käytetty patoseinänä seuraavanlaisissa SSAB:n jaottelemisissä kohteissa:

- pysyvä tukiseinä
- työnaikainen tukiseinä
- satamalaiturin perustukset, pysyvä tukiseinä
- kaivannon tukiseinäksi, joka yhtyy siltaan
- tunnelin pysyvä tukiseinä
- metroaseman tukiseinät
- sillan tuki
- korvaamaan ponttiseiniä täytön ja lähitalojen vuoksi
- padon korjausseinä
- kuilujen tukiseinä

SSAB:n porapaalutukiseiniä on asennettu seuraavissa maissa:

- Suomi
 - Uusi-Seelanti
 - Norja
 - Ruotsi
- (Perälä 2015)

4.1 Haastattelun toteutus

Yhteyttä otettiin kaikkiin SSAB:n listaamiin Suomessa RD-paaluseiniä urakoineisiin yrityksiin. Osa vetosi, että heidän kohteensa ei sovellu haastatteluun, sillä seinä on toiminut pelkästään tukiseinänä ilman patoseinävaatimusta. Haastatteluja tehtiin avoimina haastatteluna paikan päällä sekä strukturoituina haastatteluina sähköpostien välityksellä että puhelimitse. Haastateltaville luvattiin, että heidän kommenttejaan ei esitetä yksilöityinä, koska kyseessä on julkinen työ. Koska ammattikunta on maassamme pieni, jätettiin myös yritysten nimet pois, koska niiden kautta olisi pystynyt tunnistamaan haastatellut sekä heidän mielipiteensä. Haastattelut toteutettiin syksyllä 2015 syys – joulukuussa. Haastatelluista urakoitsijoista henkilöt olivat toimineet RD-paaluseinäkohteessa työnjohtajana sekä vastaavana työnjohtajana. Tilaajapuolelta haastateltavat olivat työpäälliköitä, vastaavia työnjohtajia sekä työnjohtajia. Suunnittelijapuolella haastateltavat olivat kohteen pääsuunnittelijoita tai kohteen porapaaluseinäratkaisun suunnittelusta vastanneita henkilöitä.

4.2 Urakoitsijoiden ja tilaajien haastattelut

Urakoitsijoita ja tilaajia saatiin haastateltaviksi yhteensä kuusi, jokainen eri yrityksestä. Vaikka RD-paaluseinä on verrattain uusi rakenne, neljä haastateltua oli ollut useammassa eri kohteessa. Jokaisella haastateltavalla oli kokemuksia haasteista vesitiiveyden saavuttamiseksi. On korostettava, että kukaan tilaajapuolen edustaja ei ollut kohteessa vain puhtaasti tilaajan roolissa vaan pääurakoitsijana kohteessa, tilaten tätä työkokonaisuutta. Heidän kutsuminensa tilaajiksi on sinänsä virheellistä, mutta esimerkiksi ongelmatilanteissa rooli oli ”tilaajamainen” verrattuna työtä suorittavaan urakoitsijaan. Lisäksi ankkurointikohtaan on lisätty hitsaajan haastattelu, joka oli useammassa porapaaluseinäkohteessa tilkitsemässä vuotavia ankkurikohtia.

Strukturoitujen haastatteluiden kysymykset olivat:

- Projektin osapuolet, miksi rakenne valittiin kohteeseen ja vaihtoehdot, joita pohdittiin?
- Millainen maaperä ja kallioperä kohteessa oli?
- Ilmenikö kohteen RD-paaluseinässä vesitiiveyden suhteen ongelmia? Millaisia?
- Miten niistä selvittiin?
- Oliko työnaikaisia ongelmia?
- Mikä lukotyyppejä oli kyseessä? Kokemukset lukosta?
- Mitä suunnitteluratkaisuja vesitiiveyden varmistamiseksi oli?
- Miten ne toimivat käytännössä?
- Lukon vesitiiveys ja käytettiinkö lukossa tiivistettä? Millaiset kokemukset tiivistä?
- Ankkureiden läpivientien vesitiiveys?
- Paalun alapään kalliokontaktin vesitiiveys? Mitä injektointeja suoritettiin ja niiden toimivuus?
- Mikä on RD-paaluseinän haastavin kohta vesitiiveyden saavuttamisessa?

4.2.1 Miksi porapaaluseinärakenne valittiin kohteeseen?

Yleisin peruste porapaaluseinän valintaan oli, että kohteeseen oli jo mietitty kaivinpaaluseinää, mutta aikataulun sekä urakoitsijoiden saatavuuden vuoksi päädyttiin porapaaluseinään. Pontituksella missään kohteessa ei olisi pärjätty maaperän, kokonaisrakenteen tai kaivannon syvyyden ja tarvittavan taivutusvastuksen vuoksi.

Kysyttäessä rakenteen mahdollisia korvaajia tai kilpailijoita yleisin vastaus oli myös kaivinpaaluseinä. Sen ongelmaksi nimettiin hitaus ja tekijöiden puute Suomessa. Hitaus korostuu kivisessä maaperässä. Eduksi ilmoitettiin kustannussäästöt verrattuna porapaaluseinään. Eräs tilaaja oli laskenut kustannuseroa, jossa ”porapaaluseinän kulut olivat 1,7 miljoonaa, kaivinpaaluseinän kustannus olisi ollut tasan miljoonan”.

4.2.2 Vesitiiveyden ongelmat

Urakoitsijat ja tilaajat tiivistivät ongelmiksi:

- lukosta revenneet/ irti olevat paalut
- lukkorakenne
- alapään liitoskohta kallioon
- ankkureiden läpiviennit

Lukkorakenteen ongelmat

Suuri haaste vesitiiveydelle ovat lukosta irti revenneet/ irti olevat paalut. Toisissa koh-teissa näitä oli runsaasti, toisissa kohteissa vain muutamia. Tilaajapuoli näki kollektiivi-sesti tämän olevan poraustekninen ongelma sekä poraajan ammattitaidottomuutta. Ura-koitsijapuoli taas vetosi SSAB:n tuotteisiin. Urakoitsijat sekä tilaajat puhuivat banaanin-muotoisista putkista. Eräs tilaaja oli tutkinut ilmiötä tarkemmin ja kertoi, että putkien säi-lytyspaikka ei saisi olla aurinkoinen, sillä aurinko väänsi varsinkin pitkät putket ”banaa-neiksi”. Tosin hän epäili, että nämä putket olivat osittain jo valmiiksi jonkun verran käy-riä. Naaraslukko koettiin varmemmaksi, uroslukkoja moitittiin kierteisiksi. Eräs urakoit-sija totesi ongelman johtuvan siitä, että lukot asennetaan kiinni lämpiminä ja jäähtyessään ne lähtevät kutistumaan ja kiertymään. Epäjatkuvuuskohtia aiheutui myös maaperässä olleista odottamattomista esteistä.

Eräs lukottomuuteen johtava ilmiö, joka nousi esiin, oli nk. ”seinän kaatuminen”. Lukot-tomia porapaaluja tehdessä seinä tulee urakoitsijoiden mukaan suoraan, mutta porapaalu-seinää tehtäessä ryhmittymä lähtee kaatumaan poralaitteeseen päin. Toisella urakoitsijalla puolestaan oli ongelmia seinän kaatumisesta sivuille. Nämä molemmat ilmiöt aiheuttavat lukottomia saumoja, jotta seinä saadaan suoristettua. Ilmiöt tunnistivat kaikki urakoitsijat, joista selvästi toisilla oli metodeja sen hallintaan ja toisilla ei. Myös tilaajapuolella ilmiö tunnistettiin mutta urakoitsijoiden puhuessa paaluryhmän odottamattomasta momentista, tilaajapuoli puhui liian massiivisista ja voimakkaista koneista, jotka ”repivät tunnotto-masti” paaluja maahan sekä poraajan ammattitaidottomuudesta.

Lukon bitumointi nähtiin yleisesti täysin turhana toimenpiteenä, lukuun ottamatta yhtä tilaajaa. Aikaisemmin tehdyissä kohteissa lukoissa ei ollut edes käytetty bitumia ja nämä olivat kuulemma toimineet silti kiitettävän hyvin siltin tai muun porasoijan tukkiessa lu-kot. Bitumointia tärkeänä pitänyt tilaaja vetosi tapaukseen, jossa huhujen mukaan juuri bitumoimattomuuden takia olisi tapahtunut suuret vesivuodot. Kohteessa urakoitsijana ollut puolestaan ei nähnyt tätä vesivuotojen syyksi. Bitumointia puolustanut tilaaja oli vaihtanut kantansa bitumoinnin suhteen puolen vuoden kuluttua uudestaan tavattaessa ja kohteen töiden edistyttyä. Hän totesi työmaan olevan täynnä bitumitäyteitä. Bitumin sa-nottiin valuvan ulos lukoista jo auringon vaikutuksesta kuten alla olevassa kuvassa 38.

Koska jo auringon lämpö sai ilmiön aikaan, urakoitsijoita suuresti mietitytti porattaessa syntyvä kitkan tuottama lämpö. Myös bitumia tärkeänä pitänyt tilaaja totesi jo ensimmäisellä tapaamisella eräiden työvaiheiden aiheuttavan bitumin ulosvalumista lukkoista. Lisäksi bitumin pitkäaikaiskestävyyttä kyseenalaistettiin. Yhteenvetona moni totesi, että bitumista ei ole heidän nähdäkseen hyötyä muttei myöskään haittaakaan. Erässä kohteessa oli käytetty myös rinnan Swellseal massaa lukkoissa ja tällä ratkaisulla ei huomattu olevan mitään eroa bitumoituihin lukkoihin.



Kuva 38. Kuljetuksen yhteydessä ulos valuneet bitumoinnit.

Sen sijaan haitallisena nähtiin lukkoihin kehitetty injektointikanava. Haastateltava totesi, että injektointikanavalliset lukot vaatisivat kuitenkin isompaa avarrinta ja täten rikkoisivat kalliopintaa enemmän tehden vedelle isomman reitin. Avarrin myös löyhyttää maata vieressä aiheuttaen ympärille painaumia. Itse injektointia näiden lukkojen kautta kutsuttiin optimistisimmassakin arvioissa ”uskon asiaksi” muuten lähinnä ”vitsiksi”. Jatkettavat paalut osoittautuivat täysin mahdottomiksi, sillä injektointikanavaa ei pysty hitsaamaan. Jatkoskohdat lukkojen suhteen ylipäättään olivat ongelma. Jatkamattomien paalujen injektointiakaan lukkojen kautta ei nähty järkeväksi. Kolo todettiin olevan täynnä porasoijaa huuhtomisesta huolimatta ja levittyvät lukot työskentelylle haitta. Haastateltavat olivat tietoisia injektointikanavaan asennettavasta suojatulpasta mutta myös ne teiltiin. Joko tulpat lentelivät irti poratessa tai injektoitaessa ei saatu riittävää painetta, että tulpan olisi saanut lähtemään irti, jos se ei poratessa ollut vielä lähtenyt. Eräs tilaaja totesi, että edes riittävän injektoinnin aikaansaamiseksi rakenteessa tulisi olla injektointirengas, jossa olisi enemmän pisteitä. Muuten uudentyypiset lukot saivat kiitosta verraten vanhoihin E21 -lukkoihin, joiden todettiin aukeavan poratessa.

Kallion ja paalun alapään liitoskohdan ongelmat

Kriittisimmäksi yksittäiseksi kohdaksi haastatteluissa nousi putken alapään liitoskohta. Sen olisi tarkoitus injektoitua lukkokanavan injektoinnilla, mutta tähän luotettiin heikosti. Myöskään harvalla työmaalla oltiin menetelmää saatu onnistumaan. Lukko oli niin täynnä porasoijaa ja lukon alapään oli tukkinut paalun betonointi, että vaikka käytettiin minkäläistä painetta, lukkoon ei saatu menemään yli lukon tilavuuden injektointilaastia, jos ollenkaan. Kanavainjektointeja suoritettiin työmailla suunnittelijoiden käskystä silti, ainakin virallisesti, vaikka niitä julkisesti kutsuttiin puhtaasti turhaksi työvaiheeksi, johon ei ole edes kalustoa olemassa.

Juuren suihkuinjektointi oli yleisesti tullut uusimmissa seinäratkaisuisissa korvaamaan kanavainjektoinnin. Mielenpisteet suihkuinjektointinkin tarpeellisuudesta jakautuivat selvästi kahtia. Toisissa kohteissa ne olivat onnistuneet täydellisesti ja niiden ansioksi luettiin vesitiiveys. Lisäksi oli kohteita, joissa suihkupaalujen puuttuminen koettiin ratkaisevaksi virheeksi, miksi vesitiiveyttä ei saavutettu. Eräissä kohteissa tämä rakenne oli tehty mutta urakoitsijat kutsuivat vaihetta täysin turhaksi. Oli myös rakenteita, joissa suihkupaaluja ei ollut ja niiden joukossa vesitiiveys oli ollut sekä hyvä että huono. Yleisesti suihkupaalut nähtiin erittäin huonosti soveltuviksi lohkareiseen ja kivikkoiseen maaperään. Lisäksi suihkuinjektointi saattoi eräissä kohteissa olla tosiasiallinen syy lähirakenteiden vaurioitumiseen, mutta koska sitä ei pystytty toteennäyttämään, menivät vauriot porapaaluseinän piikkiin yleisesti. Myös näkemys suihkuinjektointin avusta kallion ruhjekohtiin oli ristiriitainen. Toiset urakoitsijat uskoivat suihkuinjektointin auttavan myös kallion ruhjeisiin, kun taas toiset totesivat yksinomaan, että kalliopinnan alapuolisiin vuotoihin ei suihkuinjektointista ole minkäänlaista hyötyä. Jopa urakoitsijoita, jotka pitivät suihkuinjektointia välttämättömänä porapaaluseinärakenteen juuren vesitiiveyden kannalta, edusti kantaa, jonka mukaan menetelmällä ei pysty injektomaan kalliota. Urakoitsijoissa sekä tilaajissa oli myös voimakkaita mielipiteitä, joiden mukaan kallion esi-injektointi sekä paalujen betonointi riittävät kalliokontaktin vesitiiveyden saavuttamiseen. Suihkuinjektointien määrän kerrottiin ratkaisevasti lisääntyneet Suomessa Länsimetron jälkeen ja tulleen suunnittelussa lähes standardiksi eikä tarveharkintaiseksi. Eräässä kohteessa suihkupaalut oli tehty ennen varsinaista porapaalutusta. Kohteessa suihkupaalut olivat onnistuneet todella hyvin, mutta itse porapaaluseinässä oli esiintynyt paljon lukottomuutta.

Paalun upotus kallioon jakoi myös mielipiteitä. Varsinkin tilaajapuolella oli voimakkaita mielipiteitä, että alle metrin upotusta kallioon ei tule hyväksyä, varsinkaan sivukaltevassa kalliossa. Sivukaltevassa kalliossa nähtiin riski, että upotus alamäen puolella muodostuu vielä pienemmäksi, jos upotussyvyys yleisesti annetaan siellä tiettyyn tasoon. Urakoitsija katsoo upottaneensa paalun esimerkiksi 0,7 metrin syvyyteen, kun ylämäen puolen poraus täyttää sen ehdon, jolloin alamäen puoli jää pahimmassa tapauksessa jopa kallion pinnalle.

Maan taustainjektioinnin sekä verhoinjektioinnin erillisillä putkilla todettiin olevan perusratkaisuja ja niitä kohtaan ei esiintynyt kyseenalaistamista tai kritiikkiä. Ne koettiin tarpeellisina ja välttämättöminä. Kuten aiemmin todettiin, kaksivaiheinen verhoinjektioinnin paalun juureen ja kallioon nähtiin usein korvaavan lukon kautta tehtävän injektioinnin sekä maainjektioinnin, ja olevan ehdottomasti käyttökelpoisin injektointimenetelmistä. Erään useita kohteita tehneen urakoitsijan mukaan menetelmällä pystyi korvaamaan kalliin suihkuinjektioinninkin.

Ankkuroinnin ongelmat

Kaikki mainitsivat ankkuroinnin olevan hyvin haastavaa, mikäli operoitaessa pohjavedenpinnan alapuolella maalajina on merihiekka. Osa haastatelluista totesi, että haastavuuteen varauduttiin, jolloin ankkurointi saatiin sujumaan. Toisissa kohteissa varauduttiin, mitä ilmeisemmin väärillä keinoilla, sillä kun ankkurirei'istä kaivantoon suihkuava vesi konkretisoitui, oli jälkiratkaisuna paniikissa mietitty vaihtoehtoja kaivannon jäädyttämisestä kaikenlaisiin mahdollisiin jälki-injektointeihin eri kemikaaleilla ja lattaraudoituksiin. Tuli myös esiin vastauksia, jossa vuotoihin ei niin oltu varauduttu ja kun havahduttiin siihen, että ankkurirei'istä lentää maatkin sisään, niin paisuvilla aineilla ne oltiin kuitenkin saatu kertoman mukaan hyvin tukittua ja tämän jälkeen vasta tehty ankkurit. Eräässä kohteessa hiekkaa oli lentänyt ankkurirei'istä sisään vaikka ankkurilinjat oli suihkupaalutettu. Kohteessa ankkurit vietiin läpi paalun keskeltä.

Koska sekä tilaajat että urakoitsija suhtautuivat vältellen ankkurointia koskeviin kysymyksiin, haastattelin vielä erästä hitsaajaa, joka oli ollut useammassa kohteessa korjaamassa vuotavia ankkureita. Hänen kokemuksensa mukaan porapaalun läpi tehtävät ankkurit saadaan vesitiiviimmäksi kuin lukkojen läpi tehdyt ankkurit. Ongelmana valetun paalun läpi ankkuroitaessa tulee paalun ”takaseinän” läpäisy timantilla, varsinkin jos taustalla on lohkarista maaperää. Yleensä ankkurit vuotavat vaijerien alle jäävän kotelon alareunan kohdalta. Käytetyin keino vettä ja maata suihkuavien reikien tukkimiseen on injektointimansetin asentaminen, jonka kautta seinän vedenpaineen puolelle injektoidaan polyuretaania.

Eräs urakoitsija totesi, että vuotavien ankkureiden ja lukkosaumojen vuoksi suihkuinjektointi yleensä pysyvien patoseinien kohteissa toistetaan useampaan kertaan. Työ tulee tässä vaiheessa tehtäessä hankalaksi, koska on väisteltävä ankkurivaijereita.

Yleinen viesti

Useilta haastateltavilta tuli arvio, jossa he pitivät RD-paaluseinää hyvänä tuotteena, mutta ei vielä valmiina kokonaisratkaisuna. Työmaalle jäi liian monta asiaa päähkäiltäväksi, johon ei ollut valmiita vastauksia. Kun ongelmia yritettiin ratkoa niiden esiinnyttyä, kalliit koneet ja työvoima seisoivat odottamassa.

4.3 Suunnittelijoiden haastattelut

Suunnittelijoita saatiin haastatteluun viisi. He kaikki olivat toimineet joko pääsuunnittelijana kohteessa tai ainakin pääsuunnittelijana porapaaluseinän osin. Strukturoidun haastattelun kysymykset olivat:

- Millaisissa kohteissa olette käyttäneet RD-paaluseiniä?
- Niiden etu verrattuna muihin vastaaviin rakenteisiin?
- Millaisia ratkaisuja olette käyttäneet vesitiiveyden saavuttamiseksi?
- Kuinka ratkaisut ovat toimineet käytännössä?
- Mikä on mielestänne suurin riksi vesitiiveyden saavuttamisessa RD-paaluseinärakenteessa?
- Mitä kehitettävää näette RD-paaluseinässä patoseinänä?
- Mitä mieltä olette injektointien (verho-, kanava- ja suihkuinjektointi) tarpeellisuudesta RD-paaluseinä rakenteessa sekä niiden toimivuudesta?

4.3.1 Porapaaluseinärakenteelle soveltuvat kohteet

Yleisenä nyrkkisääntönä todettiin rakenteen soveltuvan kohteisiin, joissa ponttiseinällä ei selvitä. Syitä tähän on esimerkiksi liiallinen kivisyys ja lohkaraisuus, vesitiiveysvaatimukset ja epäily siitä, että ponttien alapäävät jäävät vajaiksi tai ponttiseinällä ei saavuteta riittävää taivutusvastusta.

Ylivertaiseksi porapaaluseinärakenne mainittiin kohteissa, joissa:

- seinän alapäässä on louhintoja,
- ajotunneleissa,
- kuiluissa,
- ympäristörajoitetuissa kohteissa, jotka eivät kestä ponttiseinän tärinää
- kellaritilojen tukiseinänä
- erittäin syvissä kaivannoissa
- vedenalaisissa rakenteissa
- rakenteissa, joissa tulee kansirakenne

Kritiikkiä sai tähän liittyen tosiasia, että kaikki ohjeistukset ovat myyjätahon tuottamia, jolloin niistä puuttuvat riskit, vaihtoehdot ja ongelmat, joiden kautta hahmottaisi, millaisiin kohteisiin rakenne ei käy ja mitkä vaihtoehdot olisivat. Rakenteen rajoitteiksi profiloituivat lähinnä ilmankäytön aiheuttamat ongelmat ja riskit ympäristölle. Oli myös teoreettista pohdintaa, onko oikein kutsua porapaaluseinää ylipäättään patoseinäksi, silloin kun rakenteessa ei ole sisäpuolista betonirakennetta.

4.3.2 Vesitiiveyden ongelmat

Itse vesitiiveydessä kärkipään ongelmiksi haastatteluissakin nimettiin alapään kalliokontaktin tyhjätilan vesitiiveys sekä lukkojen vesitiiveys. Näissäkin eri suunnittelutoimistojen näkemykset erosivat: Toiset olivat huolissaan ylipäättään lukkojen vesitiiveydestä, varsinkin kohteissa, joissa selittämättömästi syystä lukkorepeämiä oli ollut kohtalaisen paljon. Toiset taas puolestaan olivat huolissaan lukkojen pitkäaikaiskestävyydestä. Bitumitiivisteiden pitkäikäisyyteen ei uskottu. Itse lukkoakin kutsuttiin heppoiseksi ja sen korroosiosuojaus kyseenalaistettiin varsinkin kohteissa, joissa oli 100 – 200 vuoden mitoituskä ja porapaaluseinät olivat jäämässä pysyviksi rakenteiksi.

Kaiken kaikkiaan mainittuja vesitiiveyden ongelmia rakenteessa olivat:

- lukot: itse rakenne, lukottomat kohdat sekä tiivistysaineiden ja itse lukon pitkäaikaiskestävyys
- alapään kalliokontaktin tyhjätila
- ankkurikohdat
- Pilaantuneiden maiden, esimerkiksi syanidin ja fluorin vaikutus, varsinkin pysyväälle rakenteelle.

Lukkorakenteen ongelmat

Lukkoja pidettiin ylipäättään arveluttavan heppoisine. Toki kiiteltiin lukkorakenteen sinänsä kehittyneen: E21 oli monen suunnittelijankin mukaan hyvin epävarma lukko, jossa ilmeni paljon lukon rakenteen vuoksi aukinaisia lukkoja. WOM/WOF -lukkoo pidettiin yleisesti jo parempana. WOM/WOF -lukon ja RM/RF -lukon eroihin ei otettu kantaa, vaan niitä pidettiin sinänsä teknisiltä ominaisuuksiltaan samanlaisina. Bitumitiivisteeseen suhtauduttiin urakoitsijoista ja tilaajista poiketen positiivisesti ja oltiin tietoisia laboratoriotulosten hyivistä tuloksista, joissa bitumin tiivistysvaikutus oli testattu. Kuitenkin suunnittelijat, jotka olivat olleet kohteissa, joihin minkäänlaista bitumointia ei tullut, totesivat saumojen tiivistyneen muutenkin. Nykyisen tutkitun tiedon valossa, kaikki suunnittelijat olivat ehdottomasti lukkojen tiivistämisen välttämättömyyden kannalla. Varsinkin pysyväksi patoseinäksi toteutettavan porapaaluseinän lukot tuli tiivistää. Työnaikaisissa seinissä tiivistämättömyyden optio jätettiin auki. Toiset näkivät bitumitiivistyksen riittävän, toiset totesivat ehdottoman ainoan ratkaisun olevan lukkojen lattarautahitsaukset.

Lukkorepeämiä ja lukottomuutta oli kohteissa ollut vaihtelevasti: toisissa kohteissa se oli suunnaton ongelma, toisissa sitä ei pahemmin esiintynyt ja suunnittelija totesi teräsbetonipaalojen katkeamisiakin olevan todennäköisemmin kuin lukkorepeämiä. Varsinkin ensimmäisissä kohteissa olleet suunnittelijat kokivat kaikkein vaikeimmaksi, mitä ohjeistaa näissä ongelmatilanteissa. Nytemmin vakiintuneiksi käytännöiksi näyttivät tulleen

joko suihkupaalutukset ylös saakka sekä teräslevyt tai toisissa kohteissa pelkät suihkupaalutukset ylös saakka epäjatkuvuuskohtaan. Toki suihkupaalutus on lopetettava noin metriä ennen maanpintaa turvallisuussyistä. Syitä epäjatkuvuuteen ei aina saatu varmistettua edes auki kaivuun yhteydessä. Aika usein nämä laitettiin poraajan ammattitaidottomuuden piikkiin. Nähtiin myös tärkeänä, että poraajille tulisi jonkinlainen ammattipätevyystodistus, koska työn onnistuminen on pitkälti juuri heidän ammattitaidostaan kiinni. Myös erilaiset taitekohdat aiheuttivat lukottomuutta vaikka näihin kohtiin oli tilattu erilaisia kiilamaisia erityislukkoja. Lisäksi esiintyi seinän kaatumista sekä koneeseen että sivulle päin, mikä puolestaan johti lukosta irti oleviin paaluihin.

Ylipäättään suunnittelijat kaipasivat tutkimustietoa lukon pitkäaikaiskestävyydestä sekä käyttäytymisestä kovissa vesipaineissa. Suunnittelijat suhtautuivat urakoitsijoita myönteisemmin saatavilla olevaan tutkimusdataan, mutta selvästi heitäkin osittain mietitytti urakoitsijoiden voimakkaat mielipiteet datan kelpoisuudesta, urakoitsijoiden moittimasta laboratorio-olosuhteiden soveltumattomuudesta työmaalle. Lukon korroosiosuojaa pidettiin myös epäselvänä sekä kyseenalaisena asiana. Myös bitumin pitkäaikaiskestävyys kyseenalaistettiin, tosin myönnettiin, että ehkä kyse on työnaikaisesta tiivistyksestä. Toisaalta, ehkä joku määritelmä tähän työnaikaiseen tiivistysaineen käyttöikäänkin tulisi olla: esimerkiksi sulamis-jäätymissykliä kestävyys. Bitumi on kuitenkin rakenteessa lämmölle, vedelle ja pakkaselle alttiina. SSAB:n sanottiin korostavan bitumoinnin olevan vanha ja yleisesti maailmalla teräspontituksessa käytössä oleva ratkaisu. Suunnittelijakunta koki kuitenkin mitä ilmeisemmin, ettei metodista ollut tarpeeksi tutkimustietoa silti saatavilla.

Esiin nousi myös mietintöjä rakenteen kestävydestä pilaantuneiden maiden rasituksessa. Jos itse putkeen onkin huomioitu korroosiovaraa, paljonko se tulee tosi asiassa olla pysyvässä rakenteessa, joka mitoitetaan kahdellesadalle vuodelle? Tämän suhteen olemassa olevat ohjeet nähtiin hyvin puutteellisina.

Kallion ja paalun alapään liitoskohdan ongelmat

Alapään kalliokontaktin tyhjätilan injektoimiseen SSAB on kehittänyt nykyisen RM/RF-lukon kautta tapahtuvan injektoinnin. Suunnittelijoiden kesken kulki suusta suuhun tietona, että tämä injektointi ei onnistu. Nekin, jotka pitivät tätä injektointia tarpeellisenä, totesivat olevan todella haasteellista, että injektointi levittyisi ympäri paalun koko tarvittavalle alueelle eikä vain kanavan kohtaan. Silti injektointia määrättiin tehtäväksi työmailla. Eräs suunnittelija kertoi törmänneensä erikoisvalmistettuihin putkiin, joissa injektointikanavat olivat tasaisesti joka puolella putken alapäässä muodostaen renkaan, mutta menetelmä ei haastateltavan mukaan ollut toimiva, sillä myös nämä reiät umpeutuivat porattaessa paalua maahan. Pitkälti tästä syystä valtaosa suunnittelijoista korosti, että suihkupaalutus oli välttämätöntä. Vaadittava rakenne vaihteli joko metrillä kolmeen metriin ylöspäin kalliopinnasta tulevana leikkaavina suihkupaaluina, seinämäisenä rakenteena. Hajaannusta esiintyi siis siinä, kuinka paljon suihkupaalutus tulee ulottaa kallioon.

Toisten suunnittelijoiden mukaan suihkuinjektoinnilla ei ole mitään virkaa kalliassa, osa näki sen aiheelliseksi hyvin rikkonaisen kallion vyöhykkeillä ja eräät ohjeistivat sen ulottamaan kallioon standardipituutena. Jos rakenne tuli suunnittelijan mukaan ulottaa kallioon, suihkutuksen pituus vaihteli puolesta metristä metriin

Ankkuroinnin ongelmat

Ankkurikohtien suhteen vastaukset jakautuivat. Toiset suunnittelijat listasivat vesitiiveyden suhteen ehdottomasti rakenteessa kehitettäviin kohtiin ankkuriviennit rakenteen läpi. Toiset taas näkivät, että suihkupaaluttamalla läpivientilinjien taustat, nämä kohdat ovat jotenkin hallinnassa, mutta kehitettäviä. Myös todettiin, että maaputken ympäri laitettulla kumitiivisteellä ja hitsauksilla ankkurikohdat ovat kyllä hallinnassa, että kyseessä on sinänsä enemmän urakoitsijan asia kuin suunnittelun. Viimeinen vastaus tiivistä ongelman: ”Ankkurikohtiin on menetelmiä joka urakoitsijalla. Pitkälti riippuu siitä, mitä maata takana on. Jos siellä on merihiekkaa, tulee se kokemuksien mukaan suihkuamalla läpi vaikka mitä tekisi”. Ankkurivientien kohdat vaihtelivat keskelle paalua viedyistä lukon läpi vietyihin. Hajaannusta ilmeni myös ankkurikohtien suihkuinjektoinneissa. Toiset ilmoittivat ankkurilinjien vaativan suihkupaalurakenteen taakse, jotta työhön kyetään. Toiset eivät suunnitelleet tällaista rakennetta vaan sanoivat ankkuroinnin onnistumista urakoitsijoiden asiaksi.

4.3.3 Kilpailevat rakenteet

Kilpailevaksi rakenteeksi miellettiin kohteesta riippuen: kaivinpaaluseinä, pelkkä suihkupaaluseinä, kaivantoseinä ja jopa slitz-seinä. Usean kohteen kehitys oli, että ensin oli suunniteltu kaivinpaaluseinä mutta kunnianhimoisen aikataulun vuoksi sekä erityisesti urakoitsijoiden saatavuuden tähden rakenne oli vaihtunut porapaaluseinään. Varsinkin kohteissa, joissa oli porapaaluseinä tiivistettynä suihkupaaluseinällä ja vielä sisällä kaukalomainen rakenne, herätti mietteitä, josko porapaaluseinän olisi voinut jättää rakenteesta pois. Kuitenkin vielä suihkupaaluseinä yksistään nähtiin arveluttavana ja mietteet kuitattiin vielä ”teräs on aina terästä” -kommenteilla, vaikka kyse olisi ollut sinänsä porapaaluseinän suhteen työnaikaisesta patoseinästä. Kuitenkin työnaikaisia suihkupaaluseiniä on nyt rakentumassa mm. Ratinan kauppakeskuksen työmaalle Tampereelle, joten näiden kohteiden myötä saattavat mielipiteet muuttua.

4.4 Yhteenveto

Urakoitsijat sekä suunnittelijat olivat rakenteen vesitiiveyden ongelmista yllättävänkin samaa mieltä. Samat kohdat: lukot, paalun ja kallion liitos sekä ankkureiden läpiviennit nimettiin molemmilta puolilta mutta hieman eri painoituksin. Suunnittelijat miettivät enemmän rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä ja sen takaamista, urakoitsijat sekä tilaajat

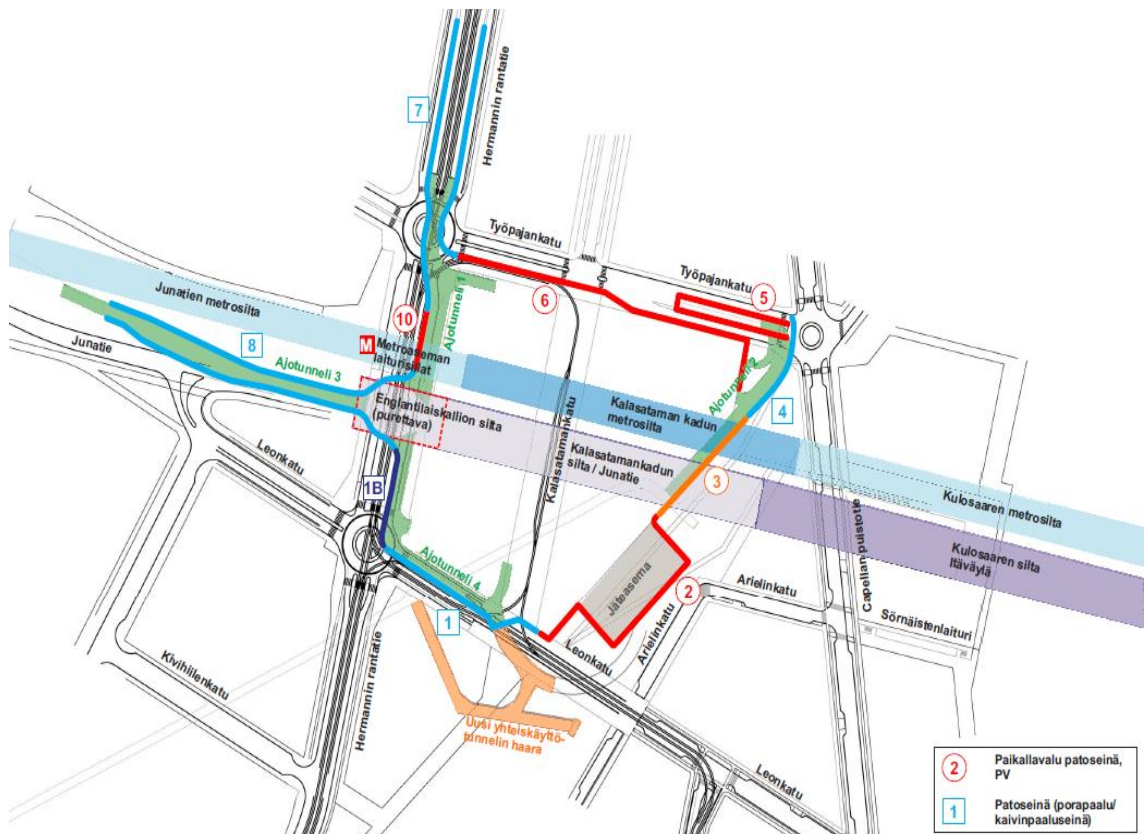
ehkä luonnollisesti, mitkä toimet ovat välttämättömiä ja mitkä turhia, toisin sanoen kokonaisuuden kokonaiskustannuksia ja aikataulua. Kärjistetysti voi sanoa, että suunnittelijoita kiinnosti, mitä kaikkia keinoja on parantaa eri kohtien vesitiiveyttä, kun taas urakoitsijoita ja tilaajia kiinnosti minimitoimenpiteiden määrä. Tässä tulee ottaa huomioon aiemmin selitetty ”tilaajien” rooli.

Selvimmät erot tuli suhtautumisessa tutkimustietoon. Suunnittelijat olivat vakuuttuneimpia lukkotiivistäiden laboratoriotestituloksista ja muusta tutkimustiedosta. Urakoitsijapuolelta ko. testit olivat kuitattavissa tutkimusarvoltaan nollassa sanan laboratorio takia. Lisäksi suurta huvittuneisuutta aiheuttivat testityömaat, joissa oli esimerkiksi maat kaivettu pois paalutuskentältä tai olosuhteet eivät vastanneet normaaleja työmaaoloja. Tässä mielipiteet jakautuivat myös koulutuksen mukaan. Eräs tilaajapuolella ollut diplomi-insinööri asemoitui enemmän mielipiteissään suunnittelupuolen mielipiteiden kanssa yksiin. Suunnittelupuolella kaikki olivat diplomi-insinöörejä. Urakoitsijapuoli yhtä aiemmin mainittua lukuun ottamatta koostui insinööreistä ja teknikoista. Suunnittelupuoli sanoi toivomukseksi aiheesta lisää tutkimustietoa, ja jos mahdollista SSAB:sta riippumattomasta tutkimustietoa. He pitivät lähinnä sitä ongelmallisena, että kaikki oppaat sekä tutkimustieto on SSAB:n suodattamaa. Urakoitsijapuolta ei ainakaan näennäisesti tutkimustieto kiinnostanut vaan tietoa vaihdettiin vertaistiedon keinoin ”puskaradiona”, ”oli kuultu, että eräällä projektilla”. Tätä tietyllä tapaa esiintyi myös suunnittelijoilla nimellä konsultaatio, ”pohdittiin yhdessä tämän oppaan/tutkimustiedon oikeellisuutta”.

Haastatteluista ilmeni, että porapaaluseinän vesitiiviiksi patoseinäksi saattamiseen käytettiin hyvin erilaisia ratkaisuja. Myös tarvittavien toimenpiteiden ääripää olivat valtavat. Varmistushaluisin olisi injektoinut kaikilla mahdollisilla keinoilla. Juuressa olisi hurjimmillaan suihkupaalut ulkopuolella, porapaalut raudoitettuna ja sementoituina sekä sisäpuolella betonirakenne. Lisäksi kalliota olisi verhoinjektoitu ja juureen olisi suunnattu vielä kanavan kautta injektointi. Lukot olisi lattaraudoitettuina, välissä sementti ja lukossa tiivistysaine. Ankkurilinjat sekä lukkokohdat olisivat suihkutettuina ylös saakka ja ankkureissa polyuretaanit, muovitiivisteet ja hitsatut suojat. Paalut upotettaisiin puolitoistametriä kallioon. Lähipenkkoja olisi etukäteen injektoitu ja mahdollisesti kaivannon pohjaa lujitettu. Toinen ääripää puolestaan luottaisi, että lukot tiivistää porasoija, kallion ja paalun kontaktin tiivistää porasoija ja viimeistään paalun betonointi. IT-massa kovalla paineella injektoidi myös kallion ruhjeet. Metrin, jopa vajaan, upotus kallioon riittää. Ankkureihin onnistutaan hitsaamaan veden virtauksesta huolimatta vesitiiviit kotelot.

5. CASE KALASATAMAN KESKUS

Helsingin Kalasatamassa sijaitsee SRV Rakennus Oy:n REDI työmaa, jossa Destia Oy toimii infratöiden projektinjohtourakoitsijana. Destialle kuuluu myös infratöiden suunnittelunohjaus. Suunnittelutoimistona on Sito Oy. Alueen infratöihin kuuluvat mm. louhinnat, patoseinät ja maatyöt. Paikalle rakentuu kahdeksan korkeimmillaan 132 metristä tornitaloa, 2000 autopaikan kallioparkki, puolitoista kertaa Kampin keskuksen kokoinen kauppakeskus sekä Esplanadin puiston kokoinen pihakansi (Kauppalehti 2016). Porapaaluluseinärakenteita kohteeseen tulee ajotunneleihin sekä ympäröimään kaivantoa, josta tornitalot lähtevät nousemaan. Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin patoseiniin 1 ja 4 vesitiivistä RD 610X12,5 paaluluseinää tuli 356 pistettä ja toisessa vaiheessa tehdyissä patoseinissä 7 ja 8 470 pistettä lisää. Seinät ovat kuvattuna kuvassa 39. Työn edetessä päädyttiin vielä lisäämään porapaalujen määrää 217 pisteellä. Yhteensä Kalasatamassa on siis porapaaluluseinää 1043 pistettä.



Kuva 39. Kalasataman keskuksen patoseinät. (Sito suunnitelmat)

Kaivanto on kooltaan 240x190 m. Kaivantoa kiertävät kuvan 39 mukaisesti paikallavallettavat patoseinät, jotka on merkitty punaisella, sekä sinisellä merkityt porapaaluluseinät. Kalliopinnan sijaitessa tason -2 alapuolella patoseinät on toteutettu porapaalutekniikalla

ja kalliopinnan ollessa tason -2 yläpuolella patoseinä tehdään paikallavaluseinä. Kaivantoa ympäröivät patoseinistä 1 ja 4 ja ne rakennettiin ensimmäisessä vaiheessa ennen työmaan keskeytystä. Porapaaluista rakennetut patoseinät 7 ja 8 sijaitsevat ajotunneleissa ja ne rakennettiin toisessa vaiheessa kesäkuusta 2015 alkaen. (Sito suunnitelmat)

5.1 Maaperätiedot

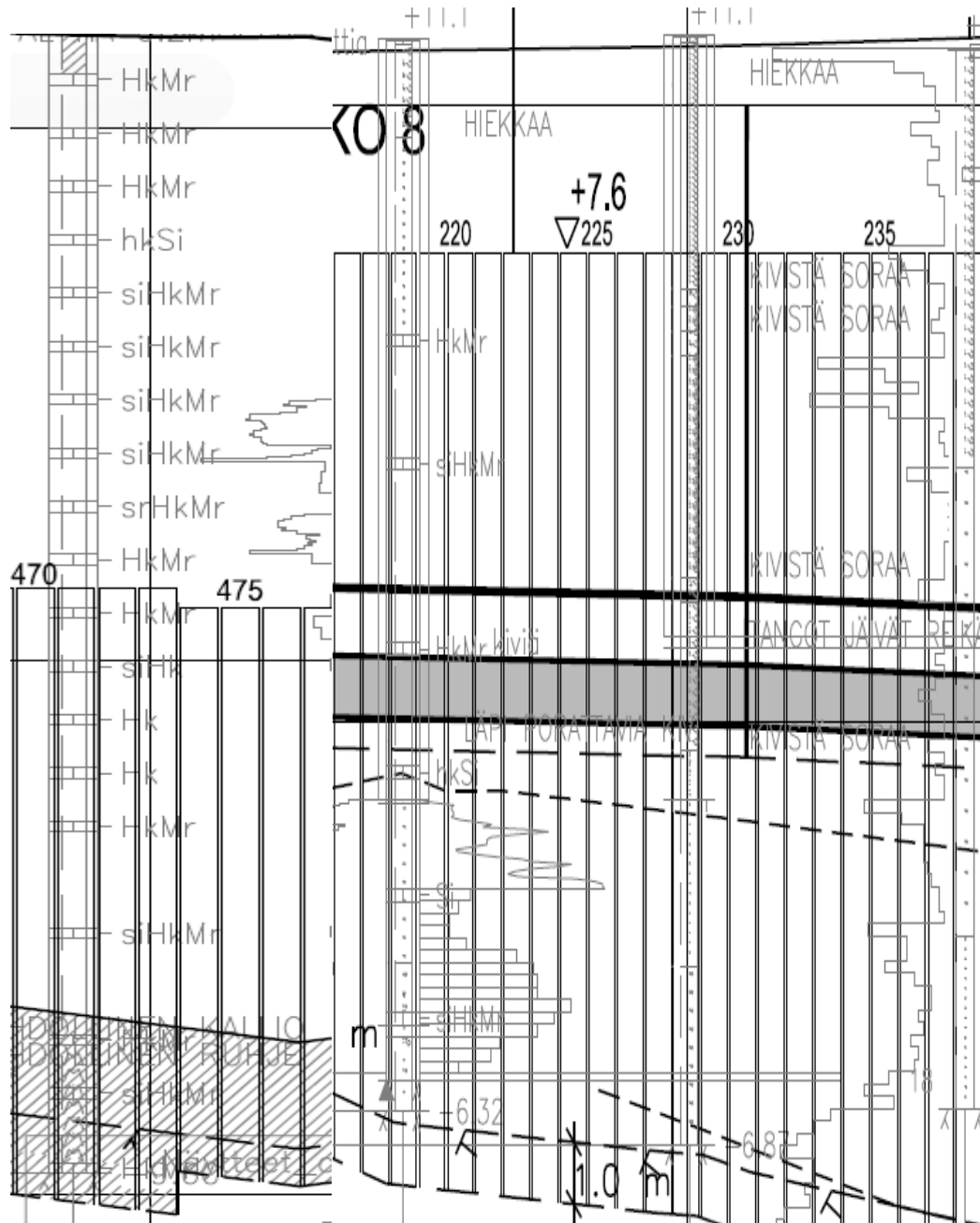
Kallioperä on pääosin kohtalaista tai hyvää. Alueen eteläosassa rakennusaluetta leikkaa kaakkois-luode -suuntaiset heikkousvyöhykkeet. Pohjaveden virtaussuunta alueella on kohti merta eli luoteesta kaakkoon. (Sito suunnitelmat)

Maaperää kohteessa oli kartoitettu Helsingin kaupungin geotekniseltä osastolta saaduista vanhoista kairastiedoista sekä tekemällä puristinheijari- ja porakonekairauksia sekä häiriintyneitä näytteenottoja. Lisäksi on käytetty lähellä tehtyjen projektien paalutustietoja. Matalissa kohdissa on suoritettu kalliopinnan korkeusaseman selvitystä aukikaivuilla. (Sito suunnitelmat)

Patoseinällä 4 maanpinta on tasolla +2. Maaperä on pintaosaltaan louhetta sisältävää täyttöä, jonka paksuus vaihtelee 2 – 3 m. Täytön alla on kolmimetrinen savi-/silttikerros ja tämän alla reilu kaksimetrinen hiekkakerros. Hiekkakerroksen alla on ohut moreenikerros, jonka alla on kalliota. Kallionpinta vaihtelee porapaaluseinän alueella jyrkästi sekä pituus- että poikkisuunnassa. Pohjamaa on routivaa ja pohjavedenpinta täytekerroksissa noudattelee lähistöllä sijaitsevan merivedenpinnan vaihtelua. (Sito suunnitelmat)

Patoseinä 1 on maaperältään täytekerroksia, joiden alla on savikerrostumia. Täyttö oli toteutettu aikoinaan mitä moninaisimmilla aineksilla. (Sito suunnitelmat)

Patoseinä 7 jakautuu kahteen osaan. Tiepenkereen osalta maaperä on koko ajotunnelissa karkearakeisia ja kivisiä täyttöjä: pääosin hiekkaa sekä hiekkamoreenia ja soraista hiekkamoreenia. Täyttökerrosten alla paalulle 60 saakka on keskitiivistä ja tiivistä hiekkaa sekä hiekkamoreenia, joiden paksuus vaihtelee kallionpinnan korkeusaseman mukaan. Paaluvälillä 60 – 135 täyttökerrosten alla on pehmeikköä. Maaperä koostuu liejuisesta savesta, siltistä ja hiekkaisesta siltistä. Vesipitoisuus on enimmillään 80 % ja siipikairalla määritetty suljettu redusoimaton leikkauslujuus on 12 – 15 kPa. Pehmeikön paksuus on enimmillään 10 – 12 m. Alapuolella on noin 10 m kerros hiekkamoreenia. Hiekkamoreeni vaihtelee kerroksittain silttisestä soraiseen hiekkamoreeniin. Pohjamaa on kokonaisuudessaan routivaa. Kallionpinta on ajotunnelin alkuosassa tasossa +2 laskien syvimmillään tasoon -20. Kallionpinta viettää suunnassa koillinen-lounas ja se on ajotunnelin länsireunalla ylempänä kuin ajotunnelin itäreunalla. Kallionpinta on hyvin jyrkkäpiirteinen, esimerkiksi tutkimuspisteiden välillä kolmen metrin matkalla kallionpinta putoaa kuusi metriä. Patoseinän 7 maalajikerrokset ja kallionpinta on vielä kuvattuna kuvassa 40. (Sito 2015)



Kuva 41. Patoseinän 8 maaperää eri kohdista. (Sito suunnitelmat)

Maaperästä on löytynyt vanhan satama-alueen ja huoltoaseman jäljiltä jäämiä, joiden vuoksi osa maaperästä on luokiteltu pilaantuneiksi maiksi ja osa kynnysarvomaiksi. Raja-arvot ylittäneissä näytteissä on ollut PAH-yhdisteiden, metallien ja öljyhiilivetyjen kohteita pitoisuuksia sekä kuonapitoista jätetäytettä. Nämä pilaantuneet sekä kynnysarvomaat ovat ajettu alueelta pois. (FCG)

5.2 Ensimmäisen vaiheen patoseinät

Vuosina 2011–2012 toteutettiin patoseinät 1 ja 4. Menetelmä oli Suomessa uusi ja kyseessä oli kautta aikojen Suomen suurin siihenastinen porapaaluseinähanke.

5.2.1 Ensimmäisen vaiheen patoseinien suunnitelmat

Yleinen työjärjestys oli patoseinä 1 osilta suunnitelmissa seuraavanlainen:

- porapaalujen poraus lukkoihin
- porapaalujen puhdistus
- porapaalujen katkaisu/ jatkaminen suunniteltuun tasoon
- tartuntaterästen ja kallion esi-injektointiputkien asennus
- porapaalujen valu, kallion esi-injektointi
- porapaalujen alapään ja kallion välisen tyhjän raon injektointi seinän takaa
- kaivu seinän edessä 1-ankkuritasoon
- ankkuritason 1 (taso -0,5) asentaminen
- kaivu ankkuritasoon 2
- ankkuritason 2 (taso -3,0) asentaminen
- kaivu ankkuritasoon 3
- ankkuritason 3 (taso -5,4) asentaminen
- juuripalkin asentaminen vaiheittain auki kaivamalla
- paalujen alapään ja kallion välinen tyhjä rako on injektoitava viimeistään juuripalkin asentamisvaiheessa
- porapaalujen päälle rakennettavan sidepalkin (tukipalkin) rakentaminen
- seinän käsittely/verhoilu erillisen suunnitelman mukaan. (Sito 2011)

Suunnittelun työselostuksissa vesitiiveyteen liittyviä asioita kuvataan tiivistetysti näin: Patoseinässä 4 käytössä oli lukkotyyppi E21. Porapaaluseinän etupuolella louhittavalle rakennuskaivannon kallioseinämälle suoritetaan kallion esi-injektointi porapaalun valuun asennetun 76 mm varausputken läpi. Esi-injektointi ulotetaan 2,0 m rakennuskaivannon tulevan louhintatason alapuolelle. Porapaalun ja kallion kontaktireikä injektoidaan varausputkien läpi noin metrin etäisyydeltä paalun alapäästä. Patoseinässä 1 puolestaan esiintyy sekä lukkotyyppiä E21 että WOM/WOF-lukkoa. Paalut ulotetaan 0,7 metriä kallioon. Lukkojen välissä käytetään Kerabit Kumisaumo tiivistysmateriaalia. Esi-injektointi suoritetaan samoin kuin patoseinässä 4. Porapaalujen välissä oleva rako ponttilukon alapuolella kallio-osuudella injektoidaan erillisellä porakalustolla seinän ulkopuolelta. Mikäli auki kaivun yhteydessä paaluseinän juuresta vuotaa hallitsemattomia vesi-/maamääriä, on kuoppa täytettävä uudelleen murskeella ja suoritettava alavälien systemaattinen injektointi ongelma-alueella ennen uudelleen kaivua. Juuripalkki asennetaan vaiheittain kalliopinnan paljastumisen mukaan. Ensin on porattava ja asennettava juuripalkkiin ankkuroituvat porapaaluseinän alle tulevat kalliopultit. Jo suunnitelmissa on varoitettu, että seinän alapään kaivun yhteydessä saattaa paalujen ja kallion kontaktipinnasta tulla vettä ja hiekkaa kaivantoon, ellei ko. rakoa esi-injektoida ennen kaivua. Jälkitiivistys-injektointi oli suunniteltu tehtävän viimeistään juuripalkin rakentamisvaiheessa. Juuripalkin suunnitelmassa on osoitettu paikat injektointiletkuille. (Sito 2011)

5.2.2 Ensimmäisten vaiheen patoseiniin liittyneet ongelmat

Työnaikaisia ongelmia ilmeni: merivesi nousi kaivantoon, hienojakoinen hiekka tuli keskeneräisen seinän läpi, avartimet rikkoivat kalliota odotettua enemmän, jolloin jouduttiin injektoimaan suunniteltua enemmän, myös pohjavedenpinta lähti laskemaan. (Kekäläinen)

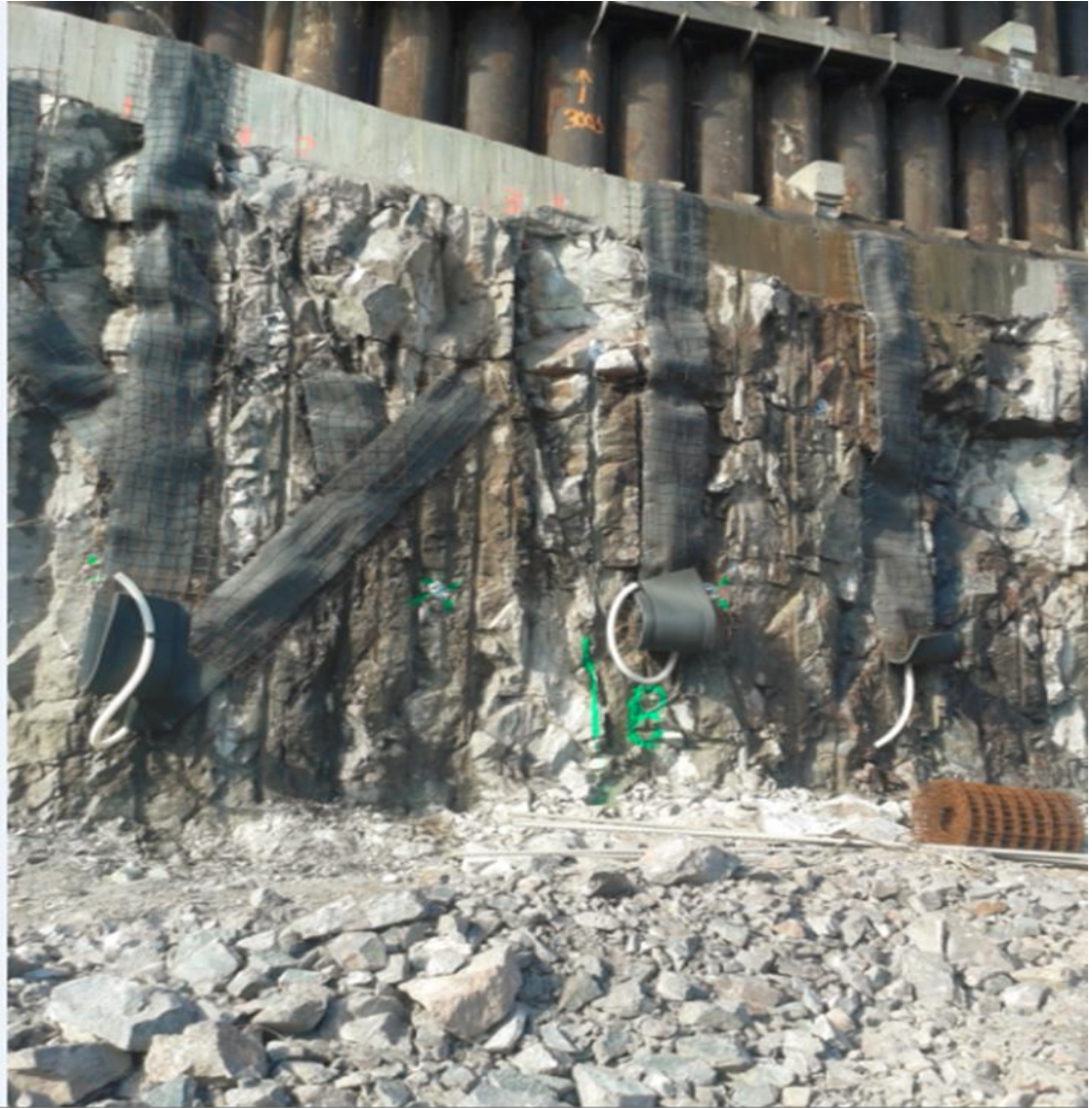
Vuotokohtia on korjattu monin eri tavoin. Seinän sisälle on asennettu pahimpiin vuoto-kohtiin hitsaamalla reunoista pontteja jättimäisiksi lattaraudoiksi kuvan 42 mukaisesti. Kotelot on injektoitu sisäpuolelta sementillä.



Kuva 42. Patoseinä 4. Laidoistaan kiinnihitsatuilla ponteilla tukittiin lukkokohtien vesi- ja maa-ainesvuotoja.

Vuotokohtia yritettiin jälki-injektoida erilaisilla veden kanssa kosketuksiin joutuessa paisuvilla polyuretaaneilla ja sementillä sekä erilaisin kiiloin ja tulpin. Lopulta juuripalkki vain valettiin vuotavasta vedestä huolimatta. Valu saatiin onnistumaan. Juuripalkki hyllytti vuotoa mutta ei lopettanut sitä täysin. (Kaarto)

Kaivannossa porapaaluseinien alapuolella suoritettiin louhintoja. Louhittu seinämä myös ruiskubetonoiitiin ja siihen asennettiin ruiskubetonisalojat kuvan 43 mukaisesti.



Kuva 43. Ruiskubetonisalaajat. (Sito suunnitelmat)

Kaikkien jälkitiivistystoimenpiteiden jälkeenkin on päädytty kuvien 44 ja 45 tilanteeseen. Tilaaja vaatii korjaussuunnitelmaa vesitiiveyden täyttämiseksi.



Kuva 44. Patoseinän 4 tilanne juuripalkin asentamisen ja ruiskubetonoinnin jälkeen.



Kuva 45. Patoseinä 4 talvella 2016. Jäätynyt vuotava vesi konkretisoi vuotavan patoseinän.

Vuotavan patoseinän syyksi arvioitiin paalun liian vähäinen upotus kallioon. Paaluja upotettiin vain 0,7 metriä kallioon. Kun kallionpinta vielä vaihteli voimakkaasti, syntyi tilanteita, jossa toinen puoli paalusta oli vaaditun 0,7 metrin verran kalliossa mutta toinen puoli on irti kallion pinnasta. Jälkeenpäin rakennettu juuripalkki ja useat injektointiyrittökset eivät parantaneet tilannetta. Korjaussuunnitelmaksi päätettiin kokeilla seinämän taakse tehtyä suihkupaaluseinää. (Kaarto)

5.3 Toisen vaiheen patoseinät

Toisen vaiheen patoseinien rakentaminen aloitettiin kesäkuussa 2015. Pitkä väli ensimmäisen vaiheen seiniin johtui suunnittelemattomasta työmaan sulkemisesta. Kaavavalitus sulki työmaan hetkessä vuonna 2012 ja sitä päästiin jatkamana vasta keväällä 2015. (Yle) Patoseinällä 7 paalupituudet olivat reilusta 18 metristä vajaaseen kolmeen metriin. Patoseinällä 8 paalupituudet olivat samaa luokkaa.

5.3.1 Toisen vaiheen patoseinien suunnitelmat

Yleinen työjärjestys suunnittelijan ohjeistuksessa oli seuraavanlainen:

- porapaalulinjan merkintä maastoon seinämän taitepisteiden mukaan
- työpedin rakentaminen porapaalukoneelle
- porapaalujen poraus lukkoihin
- porapaalujen puhdistus
- porapaalujen katkaisu / jatkaminen suunniteltuun tasoon
- tartuntaterästen ja kallion esi-injektointiputkien asennus
- porapaalun valu, kallion esi-injektointi
- paalun alapään tiivistys suihkuinjektioinnilla paalun taustalta
- injektointi RM/RF -lukkotyypin injektointikanavan kautta
- kaivu seinän edetessä ankkuritasoon 1
- ankkuritasoon 1 asentaminen
- kaivu ankkuritasoon 2
- ankkuritasoon 2 asentaminen
- kaivu ankkuritasoon 3
- ankkuritasoon 3 asentaminen
- juuripalkin asentaminen vaiheittain auki kaivamalla
- paalujen alapään ja kallion väliin jääneet mahdolliset tyhjätilat on injektoitava viimeistään juuripalkin asentamisvaiheessa
- porapaalujen päälle rakennettavan sidepalkin (kutsuttu myös nimityksellä ”tukipalkki”) rakentaminen
- seinän käsittely/verhoilu erillisen suunnitelman mukaisesti (Sito 2015)

Suunnitelmissa vesitiiveyden saavuttamiseksi oli ohjeistettu siis joka kolmannen paaluun lisätyn putken kautta tapahtuva verhoninjektointi louhittavalle osuudelle, lukkojen kautta tapahtuva kanavainjektointi sekä suihkuinjektointi. Lisäksi paalut betonoidaan IT-massalla, tarvittaessa contractor-menetelmällä, jos paalut ovat täyttyneet vedellä. (Sito 2015)

Osuudelle, jossa porapaaluseinän etupuolella tullaan louhimaan, suoritetaan kallion esi-injektointi. Se suoritetaan porapaaluihin valun yhteydessä asennettujen 76 mm metallisten varausputkien läpi. Varausputki laitettiin joka kolmanteen paaluun. Esi-injektointi suoritettiin 2,0 metriä tulevan louhintatason alapuolelle. (Sito 2015)

Kanavainjektointi oli SSAB:n kehittämä uusi innovaatio, joka ei ollut mahdollista vielä ensimmäisen vaiheen patoseinissä. SSAB oli kehittänyt uuden lukon kautta injektoinnin mahdollistavan kuvassa 46 olevan RM/RF -lukon, joka bitumoitui jo tehtaalla. Kun ensimmäisessä vaiheessa bitumointia jouduttiin hankalasti valmistamaan työmaalla, oli tämä yleistynyt käytäntö valmiiksi tehtaalla bitumoiduista lukoista toisessa vaiheessa jo yleinen käytäntö. (Sito 2015)



Kuva 46. RM/RF-lukon naarasosa bitumoituna.

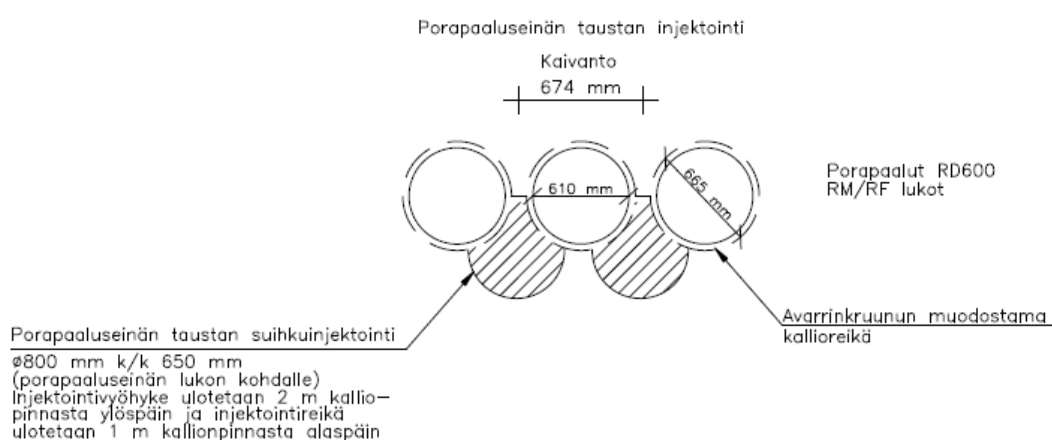
Lukkojen kautta injektointi oli työselostuksessa ohjeistettu seuraavanlaisesti:

- kanavainjektointi suoritetaan lukkokanavan päähän asennettavan / hitsattavan mansetin avulla
- injektointipaine 1Mpa = 10 bar
- sementtipohjainen injektointiaine
- suositellaan tehtäväksi lukkokanavilla vesipainekokeet
- koska tiedetään injektointikanavan tilavuus, havaitaan onnistuminen, jos massamenekki on suurempi kuin itse injektointikanavan tilavuus
- mikäli massamenekki on yli 150 litraa, kanavainjektointi lopetetaan (Sito 2015)

Työselostuksessa kanavainjektointia kutsutaan RD-paaluseinän alapään vesitiiveyden täydentäjäksi ja varsinainen tämän alueen vesitiiveyden saavuttamiseksi tehtäväksi toi-

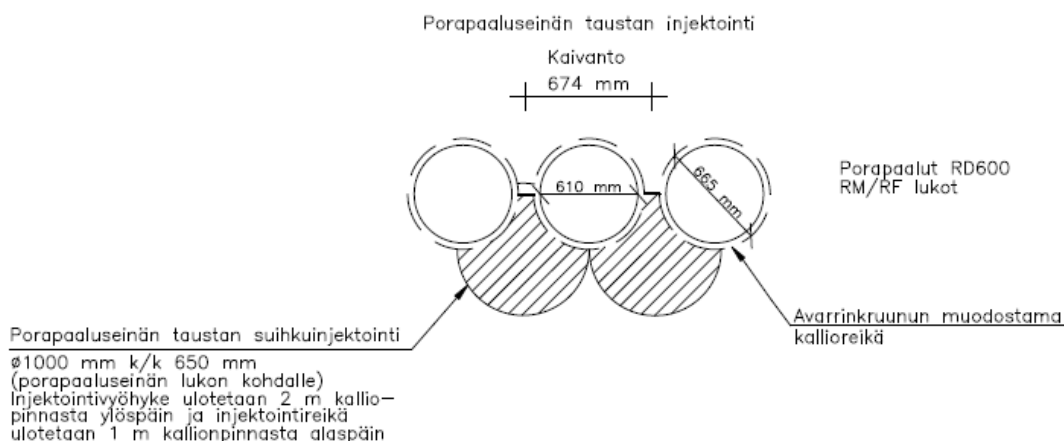
menpiteeksi on nimetty suihkuinjektointi. Suunnitelmassa kuitenkin painotetaan erikseen, että kanavainjektointia ei saa jättää tekemättä. Kanavainjektointi ohjeistetaan suoritettavaksi lukkokanavan päähän hitsattavan mansetin avulla. Injektoinnin tiedetään onnistuneen, kun massamenekki on enemmän kuin injektointikanavan tilavuus. Kuitenkin, jos massamenekki on yli 150 litraa, tulee kanavainjektointi lopettaa. (Sito 2015)

Suihkuinjektointi oli nimetty työselostuksessa siis varsinaiseksi kalliokontaktin ja paalun alapään vesitiiveyden varmistamistoimeksi. Se tehtiin ensin tehdyssä patoseinässä 8 periaatekuva 47 mukaisesti. Suihkupaalut eivät siis leikkaisi toisiaan. Itse paalu tulisi lukko-kohtaan ja ylettäisi siis 2 metriä kalliopinnan yläpuolelle. Injektointireikä tuli suunnitelman mukaan ulottaa metrin kallioon. (Sito 2015, Suihkupaalutuksen suunnitelma)



Kuva 47. Suihkuinjektoinnin periaatekuva patoseinällä 8. (Suihkupaalutuksen suunnitelma)

Seuraavaksi tehdyssä patoseinän 7 suihkupaalutusten suunnitelmassa määrä oli entisestään lisääntynyt kuvan 48 mukaisesti. Suihkupaalut ohjeistettiin tekemään toisiaan leikkaaviksi, yhtenäiseksi vyöhykkeeksi. (Sito suunnitelmat)



Kuva 48. Patoseinä 7 suihkuinjektoinnin periaatekuva. (Sito suunnitelmat)

Lopuksi työselostuksessa ohjeistettiin, että jos tiivistystoimenpiteistä auki kaivun yhteydessä havaitaan vuotoja, kuoppa on täytettävä välittömästi uudelleen murskeella ja suoritettava porapaalujen alavälien systemaattinen injektointi. Louhittavalla osuudella alapää tuetaan ja tiivistetään vielä juuripalkilla. Juuripalkkiin tulee jälki-injektointiin tarkoitetut letkut. (Sito 2015)

5.3.2 Toisen vaiheen patoseinien rakentaminen vesitiiviiksi

Työjärjestyksessä ensimmäinen toimi, joka vaikuttaa myös vesitiiveyteen, oli porapaalujen valu. Kalasatamassa porapaalut eivät olleet täyttyneet vedellä, kuten Triplassa, joten valua ei tarvinnut suorittaa contractor-menetelmällä. Haastavaksi, kalliiksi ja aikaa vieväksi sen sijaan osoittautui porapaalujen imeminen tyhjäksi porasoijasta. Varsinainen valu suoritettiin IT-massalla. Työnjohto päätyi lopulta mielipiteeseen, että jo tämä, kovalla paineella tehty valu, on täyttänyt kallion ja paalun välisen tyhjätilan sekä injektoinut kalliota. Mielipide on samansuuntainen monien haastateltujen urakoitsijoiden kanssa.

Suihkuinjektointi lohkareiseen maaperään osoittautui kyseenalaiseksi, varsinkin laadunvarmistuksen osalta. Lausunnot siitä, sopiiko suihkuinjektointi ylipäänsä kyseiseen maaperään, olivat vähintään ristiriitaisia. Ristiriita johtunee historiasta. Työmenetelmä tuotiin vauhdilla Keski-Euroopasta tutkimatta sen soveltuvuutta skandinaaviseen maaperään. Menetelmää käytettiin Kansallisteatterin peruskorjauksessa, jossa se sai tuhoja aikaiseksi ja silloin Tampereen teknisen korkeakoulun professorit Lindberg ja Hartikainen antoivat puolueettoman lausunnon, jossa totesivat että suihkuinjektoinnin käyttäminen suomalaisessa maaperässä vaatii vielä lisäselvityksiä. Tapaus sai paljon julkisuutta. (Valtiontalouden tarkastusvirasto 2006) Varsinkin suomalaiset juoksevat savet, turpeet sekä lohkariset ja kivikkoiset maaperät on vielä 90-luvulla listattu maaperiksi, joissa ”suihkupaalutus saattaa olla ongelmallista” (Viitala 1993).

Patoseinä 8 suihkuinjektoinnin laatu testattiin vain ponttiseinän takaa, kuitenkin standardin SFS-EN 12716 mukaisesti poraamalla timanttiporalla, koska suihkupaalun esiin kaivaminen ei ollut mahdollista. Testaukseen käytettiin timanttiporaa ja näytteet kerättiin 42 mm:n putkella. Kuvan 49 mukainen ensimmäinen testauspaikka viidestä sijaitti ponttiseinän alettua porapaaluseinän jälkeen.



Kuva 49. Suihkuinjektoinnin näyte numero 1 ottamista poraamalla.

Laadunvarmistus osoittautui todella hankalaksi. Kuvassa 50 näkyy, miten 11,2 metrin syvyydeltä alkaa kalliopinta. Suunnitelman mukaisesti suihkupaalun olisi tullut esiintyä suoraan kalliopinnan yläpuolella kahden metrin matkalla. Juuri tässä kohtaa näytteessä välillä 10 – 11,2 metriä sijaitsee vain sormin läpäistävää savea ja moreenia. Suihkupaalu-muodostelmaa näytteestä kuitenkin löytyi mutta vasta ylempää, jolloin se sijaitsee väärässä paikassa.



Kuva 50. Suihkuinjektointinäyte testauspaikalta 1.

Seuraavissa kuvan 51 näytteissä tilanne oli samansuuntainen. Kallion yläpuolella näytteessä on tyhjää, hienontunutta murskaa tai käsin läpäistävää höttöä. Itse suihkupaalu, jos sitä esiintyy, alkaa vasta myöhemmin.



Kuva 51. Testauspaikkojen 2–5 suihkuinjektointinäytteet 42 mm näyteputkella timanttikairalla otettuna.

Suunnittelijalta saatiin lausunto, jonka mukaan suihkupaalutus ei näiden näytteiden mukaan ole onnistunut. Päätettiin pitää kokous, johon saapui suunnittelutoimistosta suihkupaalutukseen enemmän perehtynyt suunnittelija. Kokouksessa kuitenkin asiantuntija kertoi, että suihkuinjektointi on loggeritiedoista päätellen onnistunut ja näytteenotto on ollut virheellinen liian pienen näyteputken vuoksi. Hänen mukaansa liian pieni putki on aiheut-

tanut näytteen murskautumista. Loggeritieto on koostettu data suihkupaalusta, joka kertoo käytetyn paineen, suihkutussyvyyden ja massamenekin. Suunnittelijalta saatiin allekirjoitukset työvaiheen hyväksymisestä.

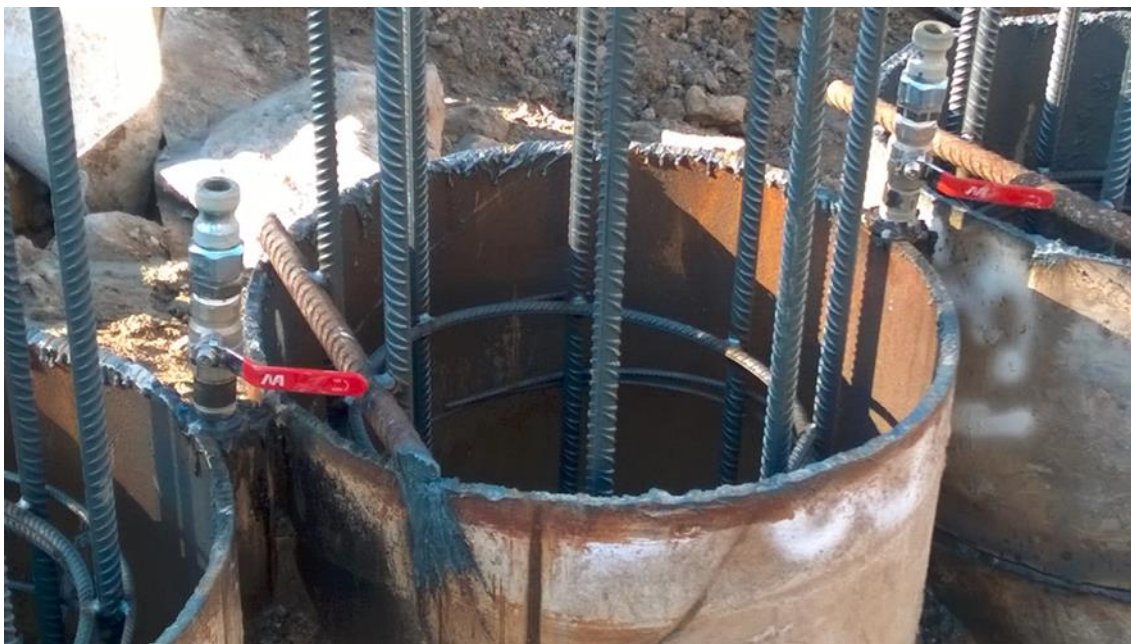
Kun laadunvarmistusta mietittiin vielä myöhemmin, törmättiin edelleen ongelmiin. Suunnittelupuoli toivoi, että näyte otettaisiin vähintään 100 mm putkella, mutta firmoja, joilta ko. laitteet löytyisivät ja he suostuisivat poraamaan näytteet lohkareisen maaperän läpi, ei löytynyt. Suuret rakennusliikkeet Suomessa otattavat näytteet 75 mm putkella mutta paaluista, jotka tulevat pinnalle, toisin sanoen timanttikärjellä ei jouduta poraamaan maaperän läpi. Suihkupaalutusyritys otatti näytteen kuvan 52 pinnalle tulevasta hiekkaisempaan maaperään tehdyistä suihkupaaluista.



Kuva 52. Pinnalle asti ulottuvia suihkupaaluja.

Kanavainjektointi tuotti työmaalla todellisia haasteita. SSAB:lta tiedusteltiin, onko työhön valmista välineistöä. Sitä ei löytynyt mutta vinkkejä, minkälaisia sovelluksia koe-kohteessa oli käytetty. Työnjohtajat päätyivät kehittämään yhdessä työtä suorittavan

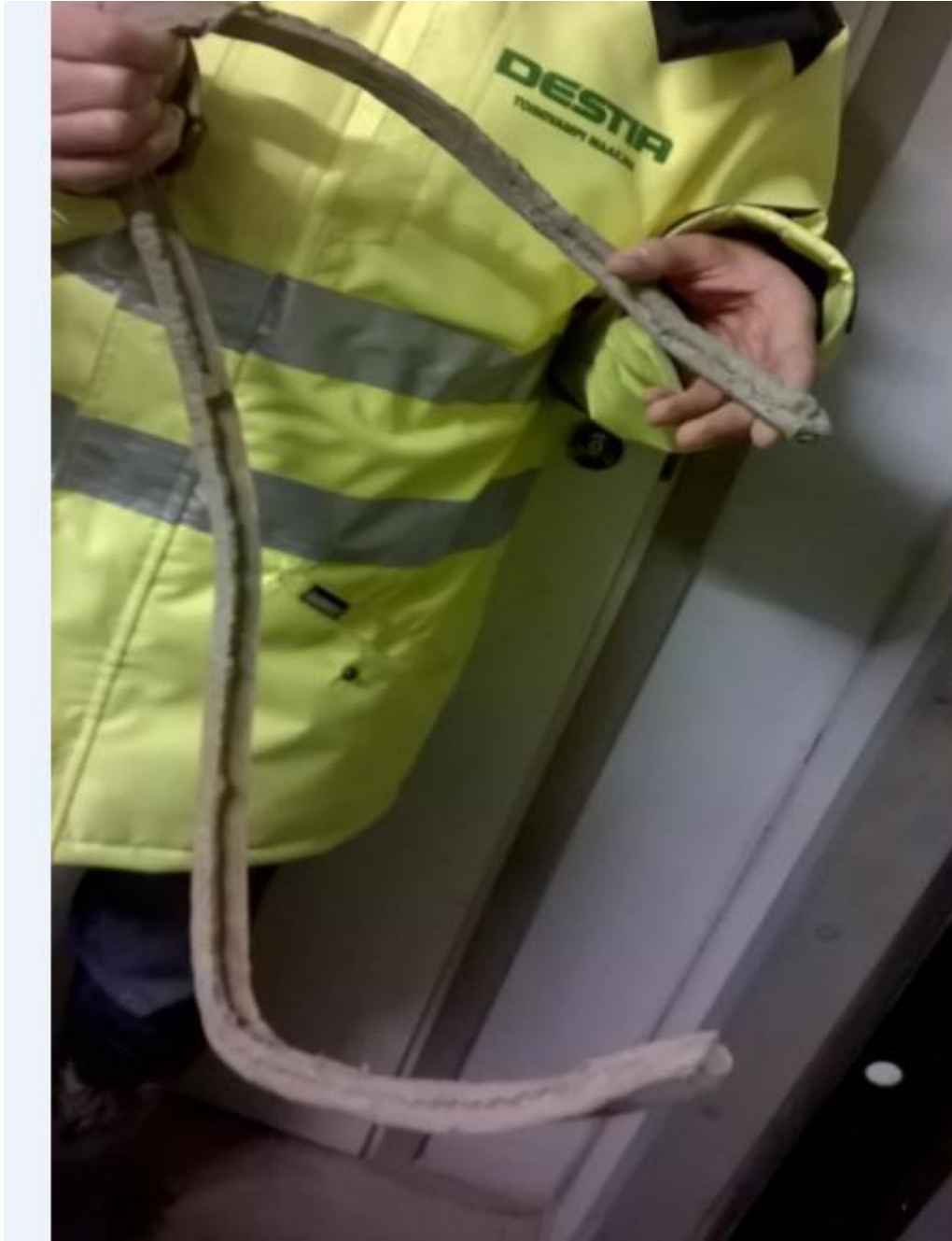
yrittäjien kanssa alla olevassa kuvassa 53 näkyvän sovellutuksen. Välineistön paikalleen saaminen oli hidasta ja vaivalloista.



Kuva 53. Kanavainjektointiin työmaalla kehitetty laitteistoa

Patoseinän 8 kanavainjektoinnissa injektointipaine vaihteli nolasta 9,2 baariin. Neljäänkymmeneen lukkoon saatiin menemään enemmän kuin yksi litra massaa. Näistä neljääntoista saatiin menemään massaa enemmän kuin injektointikanavan tilavuus oli. Injektoiduista paaluista 27,5 % voidaan sanoa siis edes teoriassa onnistuneen. Loppuihin paaluihin huuhteluista ja paineenlisäyksestä huolimatta ei saatu massaa menemään tai injektointiaessa huomattiin, että hitsaussauma oli revennyt ja massa karkasi sitä kautta ulos; tällaisia tapauksia oli kolme kappaletta.

Lukottomia kohtia tuli mutta maltillisen vähän. Nämä johtuivat yllättävistä esteistä maaperässä sekä kaatuvan paaluseinän suoristamisista. Nämä korjattiin suihkuinjektioimalla auki olevat saumat ylös saakka. Lisäksi ilmeni paaluja, joiden kalliokontakti ei ollut suunnitelmien mukainen. Tämä saattoi johtua, että kallio olikin luultua syvemmällä, jolloin paalu jäi alle katkaisutason. Tällöin paaluihin hitsattiin jatkopaloja. Eräässä tapauksessa paalu saatiin suunnitellusti porattua kallioon mutta suurporaa ei saatu irrotettua paalusta, jolloin paalu pitkien repimisten jälkeen irtosi kalliosta. Mukaan tarttui osa porapaalua kuvan 54 mukaisesti. Kyseessä oli maakengän alla oleva paalun pää. Urakoitsija piti tätä osoituksena siitä, miten toimitetut paalut ovat liian soikeita ja vaurioittavat näin porakalustoa. Jatkossa he kieltäytyivät poraamasta epäilyttäviä putkia. SSAB puolestaan laati vastineen, jonka mukaan on tyypillistä, jos paalua on hitsattu liian kovilla lämmöillä, materiaalisissa tapahtuu karmenemista ja haurastumista. Koska maakenkä joutuu kaikkein kovimmalle rasitukselle, johtaa se jopa paaluputken repeämiseen maakengän vierestä. Sen sijaan hitsauksessa tapahtuneet laatuvirheet ilmenevät juuri hitsaussaumassa tapahtuneista repeämisistä. (Mara 2015)



Kuva 54. Irronnut paaluputken pää.

Työn edetessä patoseinä 8:lle suunnitellut ponttiseinät lohkoilla 4 – 7 jo rakennettujen porapaaluseinien välissä päätettiin olosuhteiden vuoksi vaihtaa porapaaluseiniin. Tämän yhteydessä suunnittelija teki seinävaihtoehtojen teknis-taloudellisen vertailun, joka on esitetty alla olevassa taulukossa 12.

Taulukko 12. Tuiseinätyyppien vertailu asennettaessa seinä kivikkoiseen ja lohkareiseen maahan, jonka lähetyvillä on pohjaveden alenemiselle herkkiä puupaaluilla olevia rakennuksia. (Keski-Opas)

AJOTUNNELI 3
PERUSRATKAISUN JA VAIHTOEHTORATKAISUJEN VERTAILUA

Sito / A. Keski-Opas
22.11.2015

OSUUS (PLV)	PERUSRATKAISU	RD600 PORAPAAALUSEINA	SETTISEINA
LOHKOT 5-7 (PLV 100-150)	TUENTA 3 TASOLTA tukiseinä 1250 m2 ankkureita 66 kpl juuritapit 84 kpl ankkuripalkit HEB300 300 m ankkurivoimamittarit 4 kpl suihkuinjektointi 100 jm SUURET toteutus- ja ympäristöriskit	TUENTA KATTORAKENTEELLA RD600 paaluja 150 kpl RD600 paalutus 1500 jm suihkuinjektointi 100 jm suihkuinjektointimäärä pienempi kaivumassat vähenevät työtila seinän ulkopuolella lisääntyy työskentelyetäisyys tiehin kasvaa Ei toteutus- ja ympäristöriskejä	settiseinän käyttö ei mahdollinen / pohjavesi
LOHKOT 4-5 (PLV 70-100) / VASEN	TUENTA 2 TASOLTA tukiseinä 210 m2 ankkureita 9 kpl juuritapit 25 kpl ankkuripalkit HEB300 60 m SUURET toteutusriskit	TUENTA 1-2 TASOLTA RD600 paaluja 44 kpl RD600 paalutus 350 jm ankkurit x kpl ? työskentelyetäisyys kiertotiehen kasvaa ja häiriöt vähenevät (asfaltin halkeilu yms) Ei toteutusriskejä	settiseinä 210 m2 toteutusriskejä
LOHKOT 4-5 (PLV 85-100) / OIKEA	TUENTA 2-3 TASOLTA tukiseinä 135 m2 ankkureita 8 kpl juuritapit 12 kpl ankkuripalkit HEB300 40 m SUURET toteutus- ja ympäristöriskit	TUENTA 1-2 TASOLTA RD600 paaluja 23 kpl RD600 paalutus 230 jm ankkureita x kpl ? työskentelyetäisyys Junatiehen kasvaa ja häiriöt vähenevät (asfaltin halkeilu yms) Ei toteutus- ja ympäristöriskejä	settiseinä 135 m2 häiriöt Junatiehen ?! toteutus- ja ympäristöriskejä

Ponttiseinää varten yritettiin suorittaa aukikaivuuta ja välpätä maasta kiviä pois mutta kivisyys vain lisääntyi alaspäin mentäessä ja muuttuivat lohkareiksi, joihin kaivinkoneen tehot alkoivat olla jo riittämättömät, vaikka alaspäin olisi pitänyt päästä vielä useita metrejä. Tästä esimerkkikuva 55 alla.



Kuva 55. Kaivinkone välppää ja aukikaivaa kivikkoista ponttiuraa (Keski-Opas)

Lisäksi ponttaus aiheutti patoseinällä 7 samaan aikaan useista kohdista tien repeämiä sekä vieressä sijainneen talon seinän ja asfaltin välistä repeämistä. Repeämiä on esitetty alla olevissa kuvissa 56 ja 57.



Kuva 56. Asfalttia repeytynyt pontituksen vuoksi. (Keski-Opas)

Samanlaista vaikutusta ei havaittu porapaalutetuista alueista. Patoseinällä 7 pyörätie oli revennyt juuri siltä matkalta, jossa toisella puolella oli ponttiseinää, loppuen siihen kohtaan, josta porapaaluseinä jatkui. Uusia ongelmia ilmeni asfaltissa, kun seinää ankkuroitiin suurilla voimilla. Ankkuroitaessa koeveto suoritetaan pysyvissä rakenteissa 50 % jättövoimaa suuremmalla voimalla. Kohteessa koeveto suoritettiin toisinaan jopa kaksinkertaisella voimalla jättövoimaan verrattuna. Kevään koittaessa ja maan sulaessa seinä lähti liikkumaan ulospäin.



Kuva 57. Pyörätien halkeamia ponttauksen kohdalta päättyen porapaalutuksen alkamiskohtaan. (Keski-Opas)

Porapaaluseinän ankkurointi tehtiin toisen vaiheen patoseinissä lukon läpi. Ankkurikohta vesipiikattiin ja polttoleikattiin kuvan 58 mukaisesti auki.



Kuva 58. Ankkurointia varten polttoleikattu ja vesipiikaattu reikä.

Lukkoja leikatessa huomattiin, että ainakin jonkintasoinen bitumitiiviste oli säilynyt lukossa porauskitkasta huolimatta. Kuvassa 59 näkyy valuvaa bitumitiivistettä.

Hitsaaja totesi leikatun muodon olevan ongelmallinen saada tiivistettyä vesitiiviisti umpeen. Hänen arvionsa osoittautui myöhemmin oikeaksi.



Kuva 59. Esiinkaivettu ja auki leikattu lukko, jossa myös bitumitiivistettä.

Ankkuroinnissa ilmeni vesivuoto-ongelmaa jo ylemmillä tasoilla kuvan 60 mukaisesti. Työn edetessä pohdittiin, miten alemmilla tasoilla tulee käymään ja olisiko oikea ratkaisu ollut ulottaa suihkupaalut ankkurilinjojen taustoille. Suojaputki porattiin suunnitellussa kulmassa. Kyseessä olivat kallioankkurit ja upotusmatka terveeseen kallioon vaihteli. Ankkureiden punosmäärät vaihtelivat tarvittavan voiman mukaisesti. Ankkuritaso porattiin valmiiksi, jonka jälkeen taso vedettiin ankkuri kerrallaan. Tämän jälkeen kaivettiin seuraavalle ankkuroitavalle tasolle.



Kuva 60. Vuotava ankkuriaukko.

Alemmilla ankkuritasoilla vesivuoto oli valtavaa. Myös merihiekkaa suihkusi ankkuri-rei'istä kuvan 61 mukaisesti. Maa lähti lossaamaan porapaaluseinän takana sitä mukaan, kun hiekkaa ja vettä suihkusi kaivantoon. Vettä pumpattiin sakeutusaltaiden ja suodattimien kautta pois.



Kuva 61. Ankkurirei'istä tuli myös merihiekkaa.

Vuotavia ankkurireikiä yritettiin tulpata kaikilla mahdollisilla keinoilla bentoniitista sahanpuruun. Reikiin tungettiin Resfoam polyuretaanipohjaista injektointiainetta kiihdyttimellä ja Aquella pikatulppia. Uretaani halkaisi tulpan. Lopulta reikiin sullottiin puukiiloja ja mikrosementtiä kuvan 62 mukaisesti.

Ankkurit jatkoivat vuotamistaan. Eniten vettä suihkusi ankkurikohtien alapuolelta. Seinä lävistettiin injektointimansetilla ja polyuretaanilla injektointia jatkettiin. Toimenpide sai vuotoa jonkun verran hillittyä. Kuitenkin seinälle on vielä kehitettävä pysyvä ratkaisu. Eräs vaihtoehto olisi vinossa tehtävä suihkuinjektointi. Ongelmaksi muodostuu seinän takana olevan penkereen voimakas häiriintyminen, jonka päälle työkoneet tulisi saada. Vuotaviin kohtiin valettiin laajemmalle alueelle uppobetonista kotelo.



Kuva 62. Ankkurireikien tulppausta.

Patoseinältä 8 mentäessä vanhalle patoseinälle 4 kallionpinta nousee jyrkästi oikealla seinällä. Tämä tarkoitti sitä, että patoseinän 8 suihkuinjektointipaalut ulottuivat sattumalta ankkuroinnin taakse. Työmaalla tämä näkyi siten, että aina sinne saakka, jossa suihkupaalut eivät olleet ankkuroinnin takana, ankkurireiät vuosisivat voimakkaasti ja osuudella, jossa suihkupaalut olivat ankkuroinnin takana, oli täysin kuiva kaivanto ankkuroitaessa.

Seuraava haaste oli erilaisten seinätyyppien sekä aikaisemmin tehtyjen patoseinien ja uusien patoseinien yhdistäminen. Työnaikaisessa seinässä yhdistyi porapaaluseinä ja ponttiseinä. Tämä liitos hoidettiin E21 -lukolla sekä alhaalta ylös tehtävällä suihkupaalulla. Myös varsinaiset patoseinät 4 ja 8 yhdistettiin. Erilaisia ratkaisuja punnittiin. Vahvana

vaihtoehtona oli myös porapaaluseinien yhdistäminen porapaalutuksella. Lopulta päädyttiin työnaikaiseen ponttiseinään, jonka taustalle tehtiin suihkupaalut ylös saakka, jonka jälkeen paikalle valettiin kuvan 63 mukainen patoseinä.



Kuva 63. Patoseinä 4 ja 8 yhdistettiin paikallaanvaletulla patoseinällä.

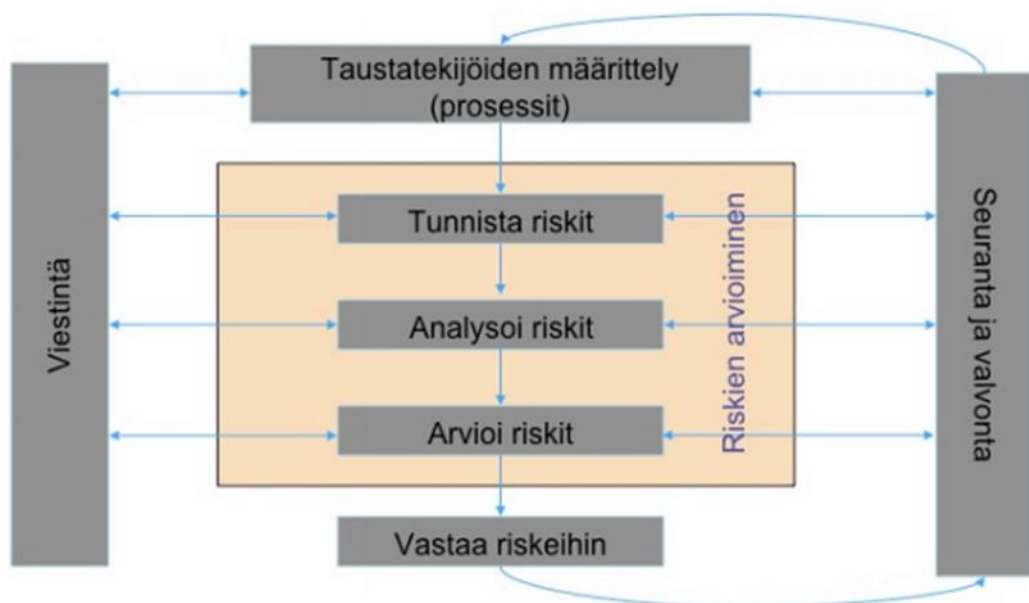
6. PORAPAAALUSEINIIN SISÄLTYVÄT KUSTAN- NUSRISKIT JA NIIDEN HALLINTA

Porapaaluseinää pidettiin kustannuksiltaan yleisesti erittäin kalliina. Kuitenkin monet suunnittelijat korostivat haastattelussa, että kun huomioi rakenteen kokonaisvaltaisesti sekä sen tuoman aikatauluedun, on sinänsä virheellistä kutsua ratkaisua kalliiksi. Lisäksi RD-paaluseinä nähtiin vähäriskisenä tuotteena.

6.1 Riski ja riskinhallinta

Riski tarkoittaa ei-toivottua tapahtumaa tai sen seurausta, joka voi tapahtua tai olla tapahtumatta. Ekonomisissa toimissa on keskiössä riski. Ekonomisten riskien otto on yrityksen toimintaa kapitalistisessa talousjärjestelmässä. (Stanford Encyclopedia)

Riskinhallinta puolestaan tarkoittaa kuvan 64 mukaista prosessoitua toimintaa. Sen keskeisenä toimenpiteenä on riskien tunnistaminen. (Heikkala)



Kuva 64. Riskienhallintaprosessi. (Heikkala)

Riskien arvioinneissa ja analysoinneissa yleensä riskit luokitellaan siedettäviin ja sietämättömiin riskeihin taulukon 13 mukaisesti. (TTL)

Taulukko 13. Riskien arviointi siedettäviin ja sietämättömiin seurauksien sekä todennäköisen esiintymisen mukaan. (TTL)

ESIINTYMINEN	SEURAUKSET		
	Vähäinen	Haitallinen	Vakava
Epätodennäköinen	Merkityksetön riski	Siedettävä riski	Kohtalainen riski
Mahdollinen	Siedettävä riski	Kohtalainen riski	Merkittävä riski
Todennäköinen	Kohtalainen riski	Merkittävä riski	Sietämätön riski

Riskeihin tulee vastata niiden merkityksen mukaan. Taulukossa 14 on yksinkertaistettu toimenpidesuunnitelma riskeille. (TTL)

Taulukko 14. Riskien merkityksien mukaiset toimenpiteet. (TTL)

RISKI	TOIMENPITEET JA AIKAJÄNNE
Merkityksetön	Ei tarvita toimenpiteitä eikä kirjaamisasiakirjoja.
Vähäinen	Ennalta ehkäiseviä toimenpiteitä ei tarvita. Pitäisi kuitenkin harkita kustannusvaikutus -suhteeltaan parempia ratkaisuja tai parannuksia, jotka eivät aiheuta lisäkustannuksia.
Kohtalainen	Riskin pienentämiseksi on ryhdyttävä toimiin ja toimenpiteet on toteutettava määrätyn ajan kuluessa.
Merkittävä	Työtä ei pidä aloittaa ennen kuin riskiä on pienennetty.
Sietämätön	Työtä ei pidä aloittaa eikä jatkaa, ennen kuin riskiä on pienennetty. Jos riskin pienentäminen ei ole mahdollista edes rajoittamattomilla resursseilla, työn täytyy olla pysyvästi kielletty.

Rakennushankeen riskit ovat monimuotoisia. Hintsanen on kartoittanut opinnäytetyössään rakennushankkeen tyypillisimpiä riskejä. Hän on jakanut taulukossa 15 riskityypit neljään osaan: kustannus-, aikataulu-, laatu- sekä force majeure -riskeihin. (Hintsanen 2008) Kuitenkin kaikki taulukossa luetellut riskit ovat viime kädessä kustannusriskejä.

Taulukko 15. Rakennushankkeen riskityypit ja riskin aiheuttajat. (Hintsanen 2008)

<i>Riskityyppi</i>	<i>Riskin aiheuttaja</i>
<i>Kustannusriskit</i>	suhdanteet
	suunnitelman kalleus
	suunnitelman virheet ja puutteet
	määrälaskentavirheet
	urakkamuodon virheellinen valinta
	vahingot
	konkurssit
<i>Aikatauluriskit</i>	rakennusluvan saanti / käsittely
	rakennusluvan valitukset
	päätösten hitaus tilaajalta
	suunnittelijan hitaus
	urakoitsijan hitaus
	lisä- ja muutostyöt
	määräysten muuttuminen
	ristiriitatilanteet
	vahingot rakennusaikana
	työvoimapula
<i>Laaturiskit</i>	tavaratoimitusten myöhästyminen
	virheelliset suunnitelmat
	puutteelliset suunnitelmat
	työnjohdon ammattitaidon puute
	työntekijöiden ammattitaidon puute
	tavaratoimitusten laatu poikkeamat
<i>Force majeure</i>	laadunvalvontamenetelmät
	puolustustila
	lakko, saarto, työsulku
	poikkeukselliset sääolosuhteet

Hintsasen opinnäytetyössä on kartoitettu laajemminkin projektinriskejä taulukossa 16 (Hintsanen 2008). Ne ovat tyypillisiä rakennusprojektin riskejä. Nämäkin jokainen riski on lopulta kustannusriski, joka pitäisi jokainen pystyä huomioimaan laskennassa. Huomioimaan joko euromääräisesti tai tietoisesti olla hinnoittelematta ja säilyttää näin riski täysin oman yrityksen riskiksi.

Taulukko 16. Projektin riskit ja riskien syyt. (Hintsanen 2008)

<i>Riski tai ongelma</i>	<i>Riskin syyt</i>
<i>Ympäristöriskit</i>	
Poliittiset muutokset	Kohdemaan epävakaus
Kilpailijoiden toimenpiteet	Epävakaa markkinatilanne
Viranomaishyväksyntä, luvat	Alueelliset tulkintaerot
Uudet lait ja säädökset	Projektin viivästyminen
Luonnonkatastrofit, säätila	Ilmaston lämpeneminen
<i>Sopimus- ja vastuuriskit</i>	
Lähtötietojen luotettavuus	Puutteelliset lähtötiedot
Tehtävän epätarkka määrittely	Puutteelliset tarjouspyynnöt
Epäedulliset sopimusehdot	Asiakaskohtaiset hankintaehdot
Riittämätön vastuuvakuutus	Kustannuspaineet, saatavuus
Ylimoitettut vastuut	Asiakkaan vaatimukset, sopimus
Suunnitteluvirheet	Kiire, tarkastusten laiminlyönnit
Reklamaatiot	Asiakkaan vaatimustaso
<i>Projektin tavoitteiden riskit</i>	
Avoimet määrittelyt	Epäselvät tarjouspyynnöt
Laajuuden muutokset	Tavoitteiden muuttuminen
Tavoitteiden muuttuminen	Suunnittelun lähtötietojen unohtuminen
Epäselvät rajaukset	Osapuolten puutteellinen koordinointi
<i>Projektiorganisaation riskit</i>	
Projektipäällikön vaihtuminen	Henkilöstövaihdokset
Vastuuhenkilöiden vaihtuminen	Henkilöstövaihdokset
Vastuunjako, rajapinnat	Johtamisjärjestelmän ongelmat
Avoimet tehtävät	Resurssipula
Henkilöstön kuormitus	Resurssipula, ylimitoitettu tilauskanta
Henkilöstön vaihtuvuus	Yrityksen kiinnostavuus, palkkataso
Valvonnan puute	Kvr-hanke

Teknologiariskit	
Uusi, kokeilematon teknologia	Toimivuuden testaamattomuus
Asiantuntemuksen saatavuus	Resurssipula
Materiaalin saatavuus ja hinta	Selvitysten laiminlyönnit
Aikatauluriskit	
Resurssien saatavuus	Yrityksen kiinnostavuus, palkkataso
Aikataulun pitävyys, viivästys	Lisä- ja muutostyöt, resurssipula, aikataulun epärealistisuus
Riittämätön suunnittelu	Toimeksiannon riittämätön laajuus
Riittämätön informaatio	Tiedonkulun ongelmat
Alihankkijoiden toiminta	Kumppanien epäonnistunut valinta
Työmenetelmät	Työkalujen uutuus / vanhanaikaisuus
Tarkastukset ja hyväksynnit	Oletettua hankalampi prosessi
Luovutus tilaajalle	Reklamaatiot
Prosessin riskit	
Riittämätön tiedonkulku	Tiedonkulun ongelmat
Puutteellinen valvonta	Valvonnan laiminlyönnit
Virheelliset työtavat	Työn organisoinnin ongelmat
Pitkät etäisyydet	Työn organisoinnin ongelmat
Taloudelliset riskit	
Kustannustason muutokset	Palkkakustannusten nousu
Viivästyssakot	Liian pienet resurssit
Maksuvaikkeudet	Puutteelliset luottotiedot
Vahingonkorvausvaateet	Tyytymättömyys toimitukseen
Puutteelliset vakuudet	Rahoituspalveluiden huono tuntemus
Valuutariskit	Epävakaat olot kohdemaassa
Inflaatio	Aikataulun viivästyminen

6.2 Riskit ja riskienhallinta sovellettuna porapaaluseinään

Seuraavassa kappaleessa olen itse soveltanut taulukkoa 15 porapaaluseinän tekoon porapaaluseinäprojektissa oppimallani sekä haastattelututkimuksessa esiin tulleilla riskeillä.

Kustannusriskit

Taulukossa 15 kustannusriskeiksi luonnehdituissa riskinaiheuttajissa suhdanteet voivat vaikuttaa porapaaluseinäprojektissa siten, että tällä hetkellä RD-paaluja valmistaa yksi tehdas. Jos Oulaisten tehdas on myynyt tilauskantansa täyteen korkeasuhdanteen aikana, on riski projektille vakava. Tämä on toistaiseksi ollut epätodennäköinen mutta RD-paaluseinän yleistettyä todennäköinen. Tällöin riski on merkittävä. Toisin sanoen ennen RD-paaluseinän rakentamispäätöstä on tiedusteltava materiaalin saatavuutta. Tämä sama pätee urakoitsijan saatavuuteen. Kaluston määrä on maassa rajallinen ja laitteisto niin kalista, että investointipäätöstä ei todennäköisesti tehdä yhden suhdanteen mukaan.

Suunnitelmien oikeellisuus ovat rakennushankkeen onnistumisen avaintekijöitä. Määrä-laskentavirheitä porapaaluseinässä ei käytännössä voi tehdä. Suunnitelmien kalleus, virheet ja puutteet sen sijaan ovat todennäköinen riski ja seuraukset yleensä aina vakavat. Infra-alalla ennen urakoitiin usein TS-mallilla, jolloin suunnittelu tuli omasta talosta tai yhteenliittymältä. Nyt hankalimmillaan suunnittelija tulee tilaajan sopimasta konsulttitoimistosta, jonka suunnittelunohjauksesta urakoitsija vastaa. Tällöin suunnittelutoimiston on luonnollisesti saatava omat laaturiskit poistettua. Tämä merkitsee RD-paaluseinän

suhteen, että neliöhinta lähtee voimakkaasti kasvamaan esimerkiksi vesitiiveyden varmistamiseksi tehtävien ratkaisujen vuoksi. Lisäksi suunnittelutoimistoja, joilla on suunnittelija, joka täyttää luvussa 2.1 taulukossa 4 esitetyn MRL:n 120d § vaatimukset, on rajallisesti. Lisäksi kyseessä on uudehko menetelmä, jonka suunnittelu ei ole vielä täysin standardoitu. Suunnittelu on siksi aikaa vievää, mikä puolestaan merkitsee kustannuksia.

Urakkamuodossa tietenkään tilaajaan päin ei pysty vaikuttamaan. Käyttäessä aliurakoitsijaa itse RD-paalutukseen urakkamuoto sinällään on varmasti vakio mutta urakan sisältö ja urakkarajat kannattaa tarkasti pohtia. RD-paaluseinä ankkurointineen, suihkupaalutuksineen, injektointineen on palapeli, jossa helposti syntyy odottelua. Työmaalla monilukuisten ja kalliiden koneiden odottelu maksaa paljon. Lisäksi kalusto tässä työlajissa on massiivista ja painavaa, jolloin työpetien teko niille yhdistettynä tähän palapeliin ja samaan aikaan yleensä käynnissä olevaan maanleikkaukseen vielä mutkistaa yhteensovittusta. Yhden vaiheen kalustorikkoutuminen tietää myös, että odottavaa kalustoa on työmaalla runsaasti tai sitten maksetaan korkeita ylimääräisiä mobilisaatiokustannuksia. Jos mahdollista, tätä yhteensovittusta kannattaisi siirtää aliurakoitsijalle ottamalla kaiken yhdeltä aliurakoitsijalta. Toki tämä puolestaan saattaa kasvattaa muita riskityyppejä, jos urakoitsija osoittautuu hitaaksi, taitamattomaksi tai hakeutuu konkurssiin. Toki näitä pystyy hallitsemaan sopimuksen sisällöllä sekä tarkalla seurannalla, selvillä välitavoitteilla ja säännöllisillä kirjatuuilla työmaakokouksilla.

Vahingot, joita ympäristölle voi saada aikaan, ovat valtavia. Tämän riskin siedettävyyttä parantavat vakuutukset. Haastatteluissa tuli vastaan RD-paaluseinäprojektin johdosta parkkitalon pohjan painuminen ja uudelleenrakennus, omakotitalon vaurioituminen lähistöllä, keinotekoiseen pohjavedensyöttöön joutuminen sekä hydrauliset murtumiset rakentaessa. Riskiä voi yrittää hallita asentamalla kohteen ympäristöön rakennuksiin painumatarkkailupisteitä sekä pohjaveden tarkkailuputkia. Erittäin tärkeää on myös käydä huolellisesti kartoittamassa vaikutusalueen rakennusten kunto ja jo olemassa olevat halkeamat ja painumat etukäteen. Lisäksi RD-paaluseinän yhteydessä käytetään nykyään vesitiiveyden varmistuksessa suihkuinjektointia. Tämä työlaji puolestaan on myös epäonnistuuksaan todellinen kustannusriski. Se saattaa tukkia lähialueen putkia ja kaivoja sekä nostaa maanvaraisia laattoja. Itse paalutuksesta saattaa myös lennellä porasoijaa hallitsemattomasti. Tätä yritettiin hallita kalasatamassa kuvan 65 mukaisesti. Lisäksi runsaan ilman käyttö työn yhteydessä saattaa aiheuttaa painumia. Haastattelututkimuksessa useat toivat ilmi, että painumia oli sattunut paljon laajemmalla vaikutusalueella kuin mitä SSAB ohjeistaa. Vahingot ovat siis pitkälti kiinni työmaan ympäristöstä ja tämä pitäisi pystyä jotenkin huomioimaan. Keskellä kaupunkia tehtävän porapaaluseinän pistehinta tulee varmasti kalliimmaksi kuin paikassa, jossa ympäristöä ei tarvitse ottaa huomioon.



Kuva 65. Porasoijan hallitsematonta karkaamista Itäväylälle suojattiin Havatorilla riiputettavilla räjäytysmatoilla.

Aikatauluriskit

Aikatauluriskit muodostuvat lopulta aina myös kustannusriskeiksi. Taulukossa 15 listattuja aikatauluriskien syitä on ensinnäkin rakennuslupaan liittyvät tekijät. Kalasatamassa realisoitui rakennusluvan valitukset ja se tuli hyvin kalliiksi. Yleensäkin RD-paaluseiniä

tehdään isoille projekteille, joihin liittyy aina lupien saamisen viipymiset sekä valitusriskit. Kuitenkin yksi näihin liittyvä riski yhdistettynä työvoimapulaan on työmaapäällikön pätevyyksien riittäminen. Tästä enemmän luvussa 2.1 taulukossa 4 sekä MRL 122 c §. Porapaaluseinä vesitiiveysvaatimuksin merkitsee, että työmaapäällikön kelpoisuusvaatimuksena on lähes aina vähintään vaativa, yleensä poikkeuksellisen vaativa. Riittävän perehtyneisyyden ja kokemuksen arvioi kunkin kaupungin rakennusvalvonta.

Aikatauluriskiin on kirjattu monia yhteistyön toimimattomuuteen liittyviä seikkoja. Nämä ovat käsitelty osin jo kustannusriskien yhteydessä. Pääsääntönä on, että uusi yhteistyökumppani on aina riski.

Lisä- ja muutostyöt on listattu aikatauluriskeihin mutta kyseessä on tilaajan kannalta myös tietenkin kustannusriski. Suunnitelmat tulisi olla pitkälle valmiina, kun sopimusta paaluttajan kanssa solmitaan. Jos upotussyvyys kallioon tai katkaisukorko muuttuvat, vaikuttavat nämä aina kustannuksiin. Lisäksi nämä tekijät eivät voi muuttua enää paalutauksien jälkeen radikaalisti. Lisäksi maaperästä löytyvät yllättävät esteet ja uudet linjaukset merkitsevät, että joudutaan tilaamaan erikoislukollisia paaluja, jotka puolestaan maksavat enemmän. Lisä- ja muutostöiden mahdollisuus pitäisi pystyä hävittämään mahdollisimman tarkasti sopimuksessa.

Laaturiskit

Myös laaturiskit muodostuvat kustannusriskeiksi. Taulukon 15 kolme ensimmäistä aiheuttajaa on käsitelty jo aiemmin. Työntekijöiden ammattitaidon puute on sietämätön riski porapaaluseinäessä. Työn onnistuminen on pitkälti kiinni kuuluisasta ”poraajan kädestä”. Myös haastatteluissa pidettiin todella ongelmallisena, että poraajille ei ole minäänlaista pätevyystodistuksia.

Tavaratoimitusten laatupoikkeamat realisoituvat yleensä kustannusriskiksi tässä yhteydessä. Jotta esimerkiksi soikea putki menisi tavarantoimittajan vastuulle, olisi pitänyt pystyä seisottamaan tavarantoimittajan alihankkijan kuljetusrekkaa työmaalla tunteja, jotta jokaisen putken olisi pystynyt jonkinlaisella muotilla testaamaan ennen purkua. Lisäksi muotin saaminen läpi toistakymmentä metriä pitkiin putkiin olisi ollut resursseja hyvin sitovaa.

Laadunvalvonta osoittautui Case kalasatama -luvussa esiin nostetusti hankalaksi suihku-paalutuksen suhteen. Lukkokohtien laatupoikkeamat tulevat esiin auki kaivuiden yhteydessä ja ilmenevät lukottomuutena, joten laadunvalvontaan ei sinänsä mene ylimääräistä aikaa. Laadunvalvontaa on kuitenkin syytä suorittaa tunnollisesti ja tarkasti sillä laatuvirheiden korjaaminen muodostuu todelliseksi kustannusriskiksi.

Muut riskityypit

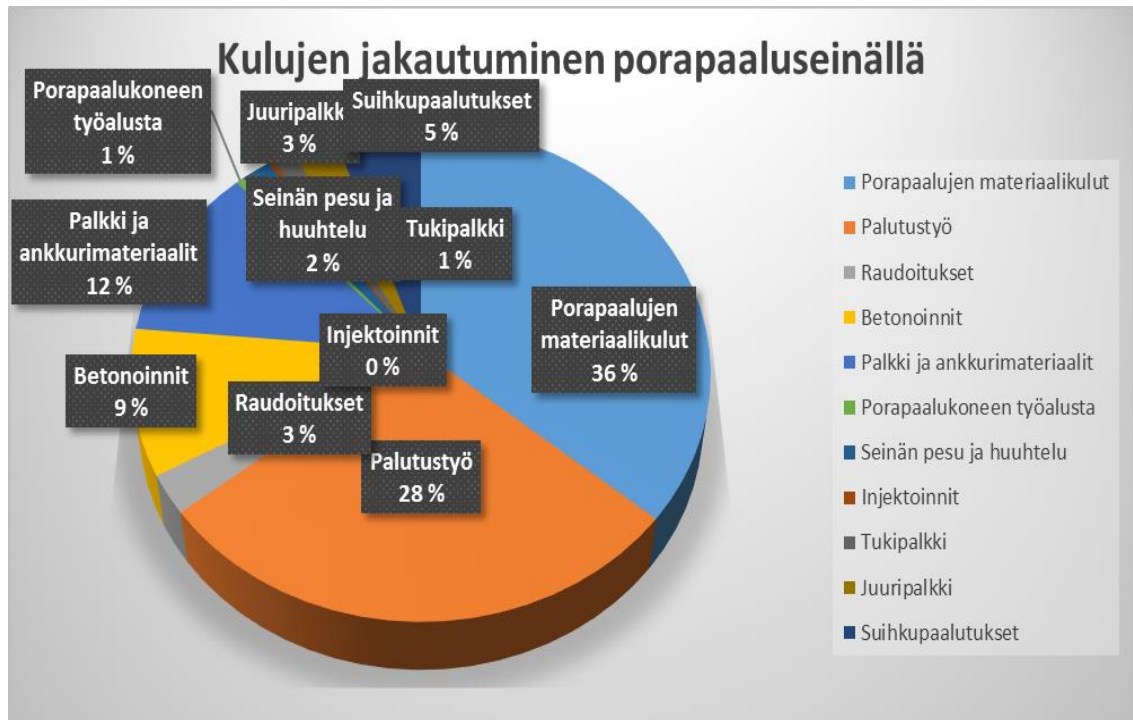
Poikkeukselliset sääolosuhteet saattaisivat porapaaluseinää rakentaessa muodostua ongelmaksi. Pitkät pakkasjaksot pysäyttäisivät suihkuinjektoinnin. Poikkeuksellisen kovat pakkaset taas pysäyttäisivät myös porapaalutuksen, sillä koneillakin on yleensä pakkasraja. Pitkät sateet yhdistettynä häiriintyviin maalajeihin ja porasoijan kerääntymiseen työmaalle saattaisivat tehdä työpetien tekemisen mahdottomaksi.

Taulukon 16 teknologiariskit koskevat kaikki porapaaluseinää. Kyseessä on vielä kuitenkin uudehko tapa rakentaa patoseinää.

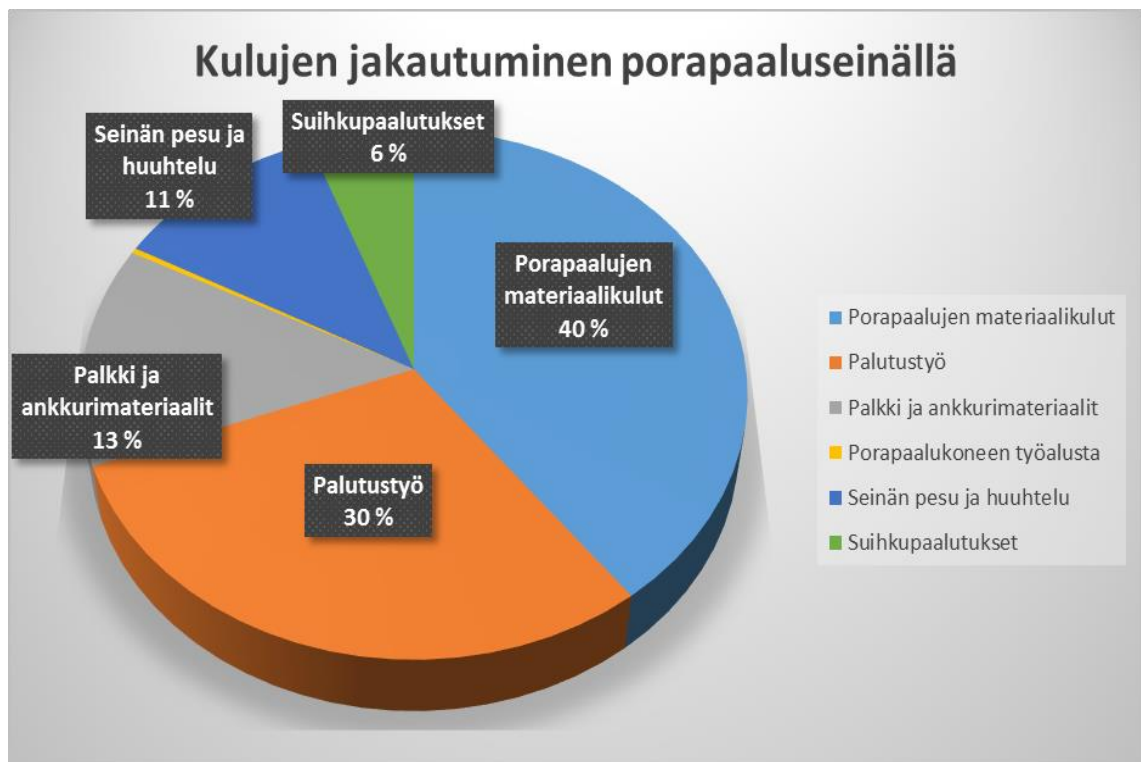
6.3 Porapaaluseinän kustannukset Kalasatamassa

Kalasatamassa patoseinän 8 osilta neliöhinta asettuu ennusteessa 1450 €/oon. Kuluihin on laskettu materiaali, aliurakoitsijan paalutustyö, kalliokontaktin eri injektoinnit, suihkupaalutus, tukipalkki, ankkuroinnit, juuripalkki, raudoitukset, betonoinnit, porapaalujen tyhjennykset sekä alustojen teko työkoneille. Jos auki kaivettaessa ei ilmene massiivisia jälki-injektointitarpeita, tuennan, juuripalkin ja jälki-injektointien jälkeen neliöhinnaksi asettuu 1220€. Kyseessä on seinä, jossa työ on onnistunut ja ympäristölle ei ole aiheutunut vahinkoja. On huomioitava, että tässä kyseisessä patoseinästä 8 on säästetty kustannuksissa, koska pysyvän seinän sisään tulee kaukalorakenne toisen urakoitsijan toteuttamana, mikä merkitsee porapaaluseinän suhteen tuennan sekä tiivistyksen vähempää tarvetta, mikä puolestaan säästää luonnollisesti kustannuksia. Maaperä on ollut haastavaa. Luvussa 5.1 on maaperäolosuhteet kuvattuna tarkemmin. Käytännössä se on merkinnyt hankaluuksia ankkurointiin sekä suihkupaalutukseen. Myös porauksessa on ollut odottamattomien esteiden vuoksi mm. lukottomuutta, mikä puolestaan on merkinnyt ylimääräisiä suihkupaalutuksia sekä rikkoutuneita porakruunuja. Sinänsä vesitiiviin porapaaluseinän neliöhinnan yleinen arviointi on hankalaa, sillä kustannukset ovat pitkälti riippuvaisia kunkin kohteen suunnitteluratkaisusta sekä kaivannon syvyydestä ja tarvittavasta tukivoimasta.

Itse kustannusten jakautumista on havainnollistettu kuvissa 66 ja 67. Kyseessä on hieman erityyppiset seinät erilaisin liitäntrakenneratkaisuin. Huomioitavaa on, että itse porapaalujen materiaalikustannusten ja työn lisäksi erinäisistä seinään liittyvistä töistä kertyi kustannuksia 36 prosenttia kokonaiskustannuksista. Tämä osuus kasvaisi entisestään, mikäli koko seinälle olisi tarvinnut tehdä kaikki pysyville tukiseinille tehdyt injektointitoimenpiteet. Tässä lasketulla seinäosuudella huomioitavaa on, että ankkurointiin sekä raudoituksiin on mennyt poikkeuksellisen vähän rahaa, koska rakenneratkaisujen takia niitä ei kaikille osuksille tarvinnut ollenkaan ja raudoitusten suunnitelmia ja realisoituvia kustannuksia edelleen odotellaan. Jopa kolmannes kustannuksista syntyy nk. aputöistä. Yllättävin suuri kuluerä oli porapaalujen imeminen tyhjäksi porasoijasta. Laskijan on oltava siis perehtynyt työhön, jotta hinta sijoittuu oikein, eikä laskennassa tapahdu suuria virheitä.



Kuva 66. Porapaalutuksen kustannusten jakautuminen eri työlajeille patoseinällä 8.



Kuva 67. Porapaalutuksen kustannusten jakautuminen eri työlajeille patoseinällä 7.

Lisäksi kuluja syntyi porasoijan ja suihkupaalutuksen paluulietteen sekä betonoinnin aiheuttamasta kuljetuksesta pois työmaalta sekä näiden jätemaksuista. Patoseinällä 8 nämä odottamat kustannukset betonin suhteen pelkästään olivat jopa 12 000 €. Lisäksi laskennassa on syytä pohtia riskivarausta. Ja tätä tulee pohtia sekä määräriskien suhteen, että

odottamattomien lisäkustannusten suhteen. Ylimääräisiä kuluja aiheuttivat suunnittelun edetessä kasvaneet suihkupaalutusmäärät, maaperän yllättävät esteet, jotka rikkoivat porakruunuja ja mahdollisesti putkia, mikä puolestaan rikkoi kalustoa ja pysäytti työt. Työmaalla tavattiin myös soikeita ja vääntyneitä putkia, joiden syystä ei päästy SSAB:n kanssa yhteisymmärrykseen. Nämä puolestaan olisi rikkonut kalustoa, jos näitä olisi lähdetty yrittämään maahan. Nyt ne jäivät vain hävikkiputkiksi, joista toki tuli ylimääräisiä kustannuksia.

Aikatauluriskejäkin toki on, vaikka tuotetta markkinoidaan sinänsä riskivapaana. Itse porapaalutus kokeneen urakoitsijan kanssa etenee sinänsä vähin aikatauluriskein. Kuitenkin on syytä muistaa, että Suomessa on edelleen talvi. Kalasatamassa kovien pakkasten aikana ei tehty porapaalutusta. Triplan urakoitsija totesi porapaalutuspäivillä, ettei porapaalutusta ole suotavaa ja järkevää kokeilla kovalla pakkasella jäätyvän porasoijan vuoksi. Putkiin jäänyt ja sulanut porasoija aiheutti myös Kalasatamassa huikeita ylimääräisiä kuluja, kun niitä yritettiin imeä paaluputkista ulos. Kovalla pakkasella työskentely aiheuttaa hänen mukaansa suuren kalustorikkoutumis- ja laaturiskin. (Pasanen 2016) Aputöissä rajoituksen aiheuttaa suihkupaalutus. Kalasatamassa suihkupaalutus oli pysähtyneenä kovan pakkasjakson ajan ja urakoitsija totesikin jatkossa asettavansa sopimukseen pakkasrajan. Myös ankkuriporaukset vaikeutuvat pakkasilla. Toisin sanoen aikataulussa on otettava huomioon talvi.

Lisäksi työmaan sijainti vaikuttaa luonnollisesti kustannuksiin. Ensiksikin porapaalutuskohteen sijaitessa keskellä asutusta työlle tulee melurajat, joista pystyttiin poikkeamaan vain satunnaisilla ylimääräisillä melulupahakemuksilla kaupungilta. Toiseksikin suojaukseen tuli kiinnittää erityistä huomiota.

Myös haastatteluissa ilmeni useita riskejä, jotka aiheuttivat urakan taloudellisen epäonnistumisen. Haastateltavan mukaan kokemattoman urakoitsijan vuoksi runsaasti lukottomuutta aiheuttava seinää ei saatu vesitiiviiksi, jolloin romahtanut pohjavesi aiheutti läheisen parkkitalon lattian romahduksen ja kalliit korjaukset. Myös Triplasta kuuluivat terveiset, että porapaaluseiniin nouseva vesi aiheutti pohjaveden dramaattisen alenemisen, mikä onneksi havaittiin ajoissa, mutta johti keinotekoiseen pohjavedensyöttöön. Lisäksi vesitiiveyden kanssa muodostui todellinen ongelma, mikä johti runsaasti lisääntyneeseen suihkupaalutukseen. Lisäksi esiintyi kertomuksia porapaaluseinän teon vaikutuksesta pohjavedenpinnan alenemisen vuoksi lähialueella romahtaneesta omakotitalosta sekä seinään liittyvän suihkupaalutuslaastin karkaamisesta salaojiin, nostamaan lähialueiden lattioita ja täyttämään lähialueiden kaivoja ja rumpuja. Tämä kaikki tietenkin tarkoittaa, että kyseessä on useasti useita riskejä sisältävää työtä, mikä pitäisi osata hinnoitella tarjoukseen tai siirtää urakkasopimuksella riskiä itseltä toiselle osapuolelle.

Resurssit työmaalla vaihtelivat. Kalustona toisen vaiheen patoseinien urakoitsijalla oli porapaalukone Bauer RG18T, jonka työpaino on 65 tonnia. Työryhmänä yhtä konetta kohden on koneen kuljettaja, apumies, luokkahitsaaja sekä työnjohtaja. Useassa vaiheessa

resurssit kaksinkertaistettiin. Toteutunut työtahti oli pitkällä, jatkettavilla paaluilla vajaa 10 paalua viikossa, lyhemmillä keskimäärin 14 paalua viikossa. Huippuvauhtina urakan loppuun kaksinkertaisilla resursseilla saatiin maahan 20 paalua per viikko per koneyksikkö.

Tahdistavimmaksi työksi osoittautui ankkurointi. Vaikkakin porapaalutus mahdollisti vähemmän määrän ankkureita verrattuna ponttiseinään. Oma haasteensa syntyi työpedin järjestämisestä raskaille koneille. Varsinkin patoseinällä 7 koneen valtava paino osoittautui suhteellisen haastavaksi liejuisessa maaperässä.



Kuva 68. Patoseinän 7 porapaalutusta

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Verratessa kirjallisuustutkimuksessa RD-paaluseinää muihin patoseinävaihtoehtoihin pystyi havaitsemaan sen ylivoimaisuuden suomalaisessa maaperässä. Se soveltuu lohkaraiseen ja kivikkoiseen maaperäänkin ilman esirakentamista, pystyy hyödyntämään suomalaista hyvää kallioperää tukivoimaksi sekä on vielä näissä olosuhteissa aikataulutehokas sekä sijainniltaan tarkka.

Kuitenkin RD-paaluseinän vesitiiveysominaisuudet kaipaavat vielä kehittämistä ja tutkimista. Vesitiiveyden ongelmat paikallistuivat:

- Kallion ja paaluputken liitoskohtaan
- Lukkorakenteeseen
- Ankkureiden läpivienteihin

Haastattelututkimuksessa ilmeni, että vesitiiveyden suhteen tehdään varmuuden vuoksi monenlaisia toimenpiteitä, vaikka niiden hyödyllisyyteen ei empiirisen kokemuksen perusteella uskota. Lisäksi menetelmissä on päällekkäisiä toimenpiteitä.

Uuden RM/RF -lukkotyypin kautta tehtävässä kanavainjektoinnissa on suuria ongelmia työmailla. Tätä menetelmää on tullut korvaamaan suihkuinjektointi. Sen soveltuminen lohkaraisiin täyttömaihin, niin että saadaan aikaiseksi täysin yhtenäinen verhorakenne, jakaa mielipiteitä. Suihkupaalutuksen ulottaminen kallioon jakautuu myös kahteen koulukuntaan.

Tärkeintä juuren vesitiiveydelle on kuitenkin riittävä upotus kallioon. Suurpaaluilla alle metrin upotukset ovat riittämättömiä, jos kallionpinta on tyypillisesti vaihteleva. Mietti- sen diplomityössä ehdotettu juuresta vuotavaan seinään myöhemmin valettava juuri- palkki ei tule Kalasataman case-tutkimuksen perusteella onnistumaan vesitiiviisti.

Porapaaluseinien mitoitusiät ovat nousseet jopa 200 vuoteen. Lisätutkimusta toivottiin rakenteen pitkäaikaiskestävyydestä. Varsinkin tämä koski lukkojen tiivistysaineiden pit- kääaikaiskestävyyttä, tosin lukkojen bitumipohjaisia tiivistysaineita kyseenalaistettiin myös vahvasti. Myös ajan sekä maaperässä ja ilmassa olevien kemikaalien vaikutusta heppoisena pidettyyn lukkorakenteeseen toivottiin tutkittavan.

Ankkuroinneissa varsinkin merihiekasta koostuvien täyttömaiden yhteydessä on suuria vesitiiveysongelmia. Tähän näyttäisi auttavan jonkin verran etukäteen tehtävä suihkupaalutus ankkurointilinjan taakse. Vuotavia ankkureikiä injektointiin parhaimmalla menes- tyksellä polyuretaanilla. Kuitenkin laboratoriotutkimuksen mukaisesti polyuretaani beto-

nirakenteen yhteydessä ei ole pitkäkestoinen apu. Lisätutkimusta vaatisi myös ideaalisimman ankkurointikohdan löytäminen. Haastattelututkimuksessa hitsaaja esitti sen olevan paalun läpi eikä lukkorakenteen läpi.

Haastatteluissa ilmeni syvä epäluottamus laboratoriossa tehtyihin tutkimuksiin sekä testikenttiin, jotka eivät jäljitelleet työmaiden todellisia olosuhteita, koska esimerkiksi maat oli niissä kaivettu jo valmiiksi pois tutkittavien paalujen sijaintikohdista. Myös SSAB:sta riippumatonta ohjeistusta kaivattiin.

Porapaaluseinän rakentamisessa sekä urakoitsijan että suunnittelijan kokemus on avainasemassa. Realisoituvat riskit virheistä ovat sietämättömiä. Porapaaluseinä on tuote eikä kokonaisratkaisu. Tämä merkitsee, että rakenne vaatii olosuhteiden mukaisia yksilöllisiä ratkaisuja työmaalla, mikä heijastuu myös suunnitteluun. Lisäksi ratkaisut on tehtävä nopeassa aikataulussa, jotta aikataulussa ja kustannuksissa pysytään.

LÄHTEET

Arcelor Mittal. Foundation solutions. Underground car parks. Saatavilla: <http://sheetpiling.arcelormittal.com/uploads/files/c0981ff1bcebe7d8146160ebc27c9a75.pdf> Viitattu 30.12.2015.

Arcelor Mittal 2. Impervious steel sheet pile walls: Design & Practical approach. Saatavilla: http://www.constructalia.com/english/publications/technical_guides/imperious_sheet_pile_walls#.Vu_7WuKLSM8 Viitattu 29.2.2016

Asikainen, N. 2009. Kaivinpaalutus Kelly-menetelmällä. Diplomityö. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 100 s. Saatavilla: [file:///C:/Users/W530/Downloads/d_niko_asikainen%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/W530/Downloads/d_niko_asikainen%20(1).pdf) Viitattu 10.10.2015.

Avopiling. Saatavilla: <http://www.avopiling.com.au/project-detail.php?s=lane-cove-tunnel-artarmon-nsw> Viitattu 22.3.16.

Cofra. Cutoff wall. Saatavilla: <http://cofra.com/activities/cutoff-wall-installation/> Viitattu 29.3.2016.

Eronen, S. 1997. Drilled piles in scandinavia. Tampere. TTKK Publications 40.

Evans J. C. 2008. Alamos Gap: A Case Study Using The Trench Remixing And Deep Wall Method. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Saatavilla: <http://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2803&context=ic-chge> Viitattu 27.3.2016.

FCG. 2015. Kalasataman keskus: Kaivu- ja näytteenottosuunnitelma. 28s.

Finnsementti. Suihkuinjektointi. Saatavilla: <http://www.finnsementti.fi/Tietoa-stbailoinnista-suihkuinjektointi>. Viitattu 9.10.15

Heikkala, M-S. 2009. Riskienhallinta: Riskiraportoinnin ja riskienhallinnan kehittyminen – Case Kemira Oyj, Neste Oil Oyj, Aspo Oyj ja Finnlines Oyj. Maisterin tutkinnon tutkielma. Helsinki, Helsingin kauppakorkeakoulu, Markkinoinnin ja johtamisen laitos. 104 s. Saatavilla: http://epub.lib.aalto.fi/fi/ethesis/pdf/12059/hse_ethesis_12059.pdf Viitattu 3.4.2016.

Hintsanen, S. 2008. Rakentamisprojektin arviointi Due Diligence -menettelyillä. Insinööritö. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia. Tekniikan ja liikenteen toimiala. Rakennustekniikka. 57 s. Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/38556/stadia-1209045938-3.pdf?sequence=1> Viitattu 3.4.2016.

Ignat, B. 2014. Maanalaisen pysäköintilaitoksen ulkoseinien kustannus- ja rakennettavuusvertailu: kaivantoseinä ja teräsponttiseinä. Opinnäytetyö. Lappeenranta, Saimaan

ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 45 s. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77836/Barakshin_Ignat.pdf?sequence=1 Viitattu 31.3.2016

Kaarto, S. Haastattelut 2015–2016.

Kauppalehti 26.12.2015. Saatavilla: <http://www.kauppalehti.fi/uutiset/montusta-nousee-helsingin-tulevaisuus/8FcsMWeH> Viitattu 29.12.2015.

Kekäläinen, H. Sähköposti. 29.6.2015.

Keller. TRD – Soil Mix Walls. Saatavilla: <http://www.haywardbaker.com/What-WeDo/Techniques/AdditionalServices/TRDSoilMixWalls/default.aspx> Viitattu 29.3.2016.

Kemppainen, H. 2006. Paalutustyöt vaikeasti läpäistävien täyttöjen kohdalla. Opinnäytetyö. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 87 s.

Keski-Opas, A. Haastattelu. Palaverit. Kuvat.

Leivo, V. & Rantala, J. 2000 Maanvaraisten pohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. Tampere. TTY Julkaisu 106.

Liikennevirasto. 2013. Pohjaveden hallinta alikulkupaikoilla. Geotekniikan käsikirja. 40s. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lop_2013-01_pohjaveden_hallinta_web.pdf Viitattu 12.10.2015.

Mara, J. Sähköpostivastaus 19.11.2015.

Miettinen, L-V. 2014. The Rotational Stiffness and Watertightness of RD Pile Walls in The Bedrock and Pile Interface. Diplomityö. Tampere, TTY, Rakennesuunnittelu. 104 s. Saatavilla: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22105/Miettinen.pdf?sequence=3&isAllowed=y> Viitattu 17.4.2016.

Molarius, R. 2005. Pohjavesitutkimusopas. Suomen vesiyhdistys. 194 s.

Nemati, K. M. 2005. Temporary structures: Slurry Trench / Diaphragm Walls. Tokyo Institute of Technology. Department of Civil Engineering. Saatavilla: <http://www.cv.titech.ac.jp/~courses/atce2/Lesson6.pdf> Viitattu 29.3.2016.

Palolahti, A. Haastattelu & sähköpostit

Pasanen, J. 2016. Case Pasila tripla - Urakoitsijan näkökulma. Esiintyminen SSAB:n porapalupäivillä 21.1.16. Saatavilla: <http://www.ssab.fi/teraspaalupaiva2016> Viitattu 5.2.2016.

Perkkiö, H. 2009. Tuettujen kaivantojen riskienhallinta. Diplomityö. Helsinki, TKK, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 89s.

Perälä, A. SSAB. Sähköpostit.

Rantamäki, M. & Tammirinne, M. 1996. Pohjarakennus. Hämeenlinna. Karisto Oy.

RIL. 2012. RD-paaluseinä sai GeoTeko –tunnustuspalkinnon. Saatavilla: <http://www.ril.fi/fi/etusivu/ajankohtaista-2/rd-paaluseina-sai-geoteko-tunnustuspalkinnon.html> Viitattu 3.4.2016.

RIL 207-2009. Geotekninen suunnittelu - eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 244 s.

RIL 254-2011. 2011. Paalutusohje 2011.Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 261 s.

RIL 263-2014. 2014. Kaivanto-ohje. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 208 s.

http://www.rockal.com/rockal_tech_retwall.html CFA-paalufirman sivut. Viitattu 28.12.2015.

RD-paalutusohje: Suunnittelu- ja asennusohje porattaville RD- ja RDs-paaluille. 01/2010 päivitys. Saatavilla: <http://www.ruukki.no/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Te%20RD-paalutusohje.ashx> Viitattu 2.11.2015.

RD-paaluseinä. Ruukin tuote-esite. Saatavilla: <http://www.ruukki.fi/Teras/Infrastruktuuriratkaisut/Tukiseinarakenteet/RD-paaluseinat> Viitattu 12.10.2015

RT 04/2015. Pasilan Tripla käynnistyi. Saatavilla: <http://rakennustaito.fi/rakentaminen/pasilan-tripla-kaynnistyi/> Viitattu 28.12.2015.

Ruukin teräspaalupäivät 2011. Saatavilla: http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Seminaarimateriaalit/Teraspaalupaiva%202011/Ruukki-RD-paaluseina_vaati-viin_olosuhteisiin_Hannu_Vesamaki.pdf Viitattu 12.10.2015

Ruukin teräspaalupäivät 2012. Saatavilla: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Seminaarimateriaalit/Teraspaalupaiva%202012/Ruukin%20terspaalutuotteet%20pivitykset%20ja%20tuoteuutuudet%20Hannu%20Vesamki%20Ruukki.pdf> Viitattu 12.10.2015

Ruukki. Teräsputkipaalujen jatkaminen hitsaamalla. 05/2008 päivitys. Saatavilla: <http://www1.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Ruukki-Ter%C3%A4sputkipaalujen-jatkaminen-hitsaamalla.ashx> Viitattu 2.11.2015.

Ruukki 2. Tukiseinäratkaisu kaikkiin olosuhteisiin. Saatavilla: <http://www1.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Tukiseinat%20esitteet%20ja%20ohjeet/Ruukki-Esite-RD-paaluseina.pdf> Viitattu 7.12.2015

Rämö, S. & Hakanen, T. 2016. Tallinnan Rotermann-korttelin peruskorjaus ja laajennus. SGY:n jäsenlehti Geofoor. Nro 45. Saatavilla: file:///C:/Users/W530/Downloads/SGY_Geofoor_lehti_45_maaliskuu2016_netti.pdf Viitattu 31.3.2016

Savola, P. 2004. Porapaalujen käyttösovellukset pohjarakentamisessa. Diplomityö. Espoo, TKK, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 102 s.

Sito 2011. Kalasataman keskus, Infrarakenteet, Patoseinät 1 & 4. Työselostus.

Sito. 2015. Kalasataman keskus, Infrarakenteet, Ajotunneli 1, Patoseinät 7A – 7B ja työn-aikainen tukiseinä: Toteutusvaihe, Työselostus. Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto. 26 s.

Siton suunnitelmat. Kalasataman infratöiden suunnitelmat.

SSAB RD-paaluseinä. Saatavilla: [file:///C:/Users/W530/Downloads/SSAB_RD_paaluseina_FI%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/W530/Downloads/SSAB_RD_paaluseina_FI%20(3).pdf) Viitattu 2.11.2015.

Stanford Encyclopedia of Philosophy. Saatavilla: <http://plato.stanford.edu/> Viitattu 3.4.2016

Talja, A & co 2006. Ruostumaton teräs maa- ja vesirakentamisessa. Espoo. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W65.pdf> Viitattu 7.12.2015.

Tripla by YIT. Saatavilla: http://www.yit.fi/yit_fi/tripla/nain-tripla-rakentuu Viitattu 17.4.2016.

TTL. Vesihuoltolaitosten työturvallisuusopas. Saatavilla: http://www.ttl.fi/partner/vesihuoltolaitosten_tyoturvallisuusopas/riskit/sivut/default.aspx Viitattu 3.4.2016.

TTY 2014. Water-Tightness tests on RM/RF Interlocks of RD Pile Wall. Department of Civil Engineering. Research Report NO: TRT/2327/2014.

TTY 2014 2. Exposure of pile Wall Interlock to Liquid Chemicals and Artificial Ageing. Department of Civil Engineering. Research Report NO: TRT/2325/2015.

TTY 2015. Water-tightness tests for RM/RF interlocks of RD pile wall with different installation methods of bitumen-based sealant. Department of Civil Engineering. Research Report NO: TRT/2372/2015.

TTY 2015 2. Water-tightness tests on RM/RF interlocks of RD pile walls with different sealant thicknesses. Department of Civil Engineering. Research Report NO: TRT/2373/2015.

Tyynelä, P. 2016. Case Pasila Tripla - Suunnittelijan näkökulma. Esiintyminen SSAB:n porapaalupäivillä 21.1.16. Saatavilla: <http://www.ssab.fi/Tuotteet/Terasluokat/Infrastrukturi/Events/FI-Steelpile-day-2016> Viitattu 26.2.16.

Uotinen, V-M. & Jokiniemi, H. 2013. RD pile wall – A new way to build micropile retaining wall structures. Saatavilla: <ftp://dfi.org/ISM-FinalPapersForProduction/17%20-%20Final%20Paper%2013%20-%20Uotinen%20and%20Jokiniemi%20-%20RD%20Pile%20Wall.pdf> Viitattu 8.2.2016.

Vallius, P. 2005. Pohjavesitutkimusopas. Suomen vesiyhdistys. 194 s.

Valtiontalouden tarkastusvirasto. Tarkastuskertomus 132/2006: Suomen Kansallisteatterin peruskorjaus. Saatavilla: https://www.vtv.fi/files/1199/1322006Kansallisteatterin_peruskorjaus_netti.pdf Viitattu 23.3.2016.

Viitala, J. 1993. Suihkupaalut pohjarakentamisessa. Diplomityö. Espoo, TKK, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 89 s.

Vunneli, J. 2016. Case Pasila Tripla – Rakennuttajan näkökulma. Esiintyminen SSAB:n porapaalupäivillä 21.1.16. Saatavilla: <http://www.ssab.fi/Tuotteet/Terasluokat/Infrastrukturi/Events/FI-Steelpile-day-2016> Viitattu 29.2.16

Yatskevich, Y. 2010. Design of continuous flight auger pile foundation for a multi-storey apartment building. Opinnäytetyö. Lappeenranta, Saimaa University of Applied Sciences, Faculty of Technology. 43 s. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/17379/Thesis%20Y_Yatskevich%200901284.pdf?sequence=3 Viitattu 6.9.2015.

Yle. Kalasataman tornitalojen pystytys alkaa viimein – kolme vuotta myöhässä. Saatavilla: http://yle.fi/uutiset/kalasataman_tornitalojen_pystytys_alkaa_viimein__kolme_vuotta_myohassa/8252034 Viitattu 22.3.2016.